



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Зоран Ћургуз

МЕРЕЊЕ И АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИЈЕ РАДОНА ПАСИВНОМ  
И АКТИВНОМ МЕТОДОМ НА ПОДРУЧЈУ ГРАДА БАЊА ЛУКЕ

Докторска дисертација

Крагујевац, 2014

## Захвалнице

Ова докторска дисертација настала је као резултат личног рада и свесрдне помоћи указане са разних страна Света.

Овом приликом желим да се са осећањем великог задовољства захвалим свом ментору, проф. др Драгославу Никезићу, редовном професору ПМФ-а у Крагујевцу, на поверењу и могућности да ову тему радим са њим и на овој установи и уложеним знањем и трудом на подизању самог нивоа ове докторске дисертације.

Искрена и топла захвалност др Зори С. Жунић, вишем научном сараднику у Институту за нуклеарне науке Винча из Београда, др Предрагу Колажу, истраживачу са Физичког института у Београду, који су ми дали смернице за овај рад, увијек били при руци са значајном стручном помоћи и дали немерљив допринос при изради ове тезе.

Захвалност дугујем др Зденки Стојановски, доценту на факултету Медицинских наука у Штипу на помоћу при статистичкој обради резултата, мр Горану Јаушевцу, вишем асистенту на Саобраћајном факултету Добој на помоћи при статистичкој и техничкој обради резултата и текста.

Захвалност дугујем Министарству просвете Републике Српске које ми је омогућило контакт са Основним школама Града Бања Луке, ПМФ-у у Бања Луци, Одсек физика на челу са др Бранком Предојевићем, редовним професором, који су ми ставили на располагање уређај Рад 7. Морам истаћи и велику техничку помоћ Милана Поповића, лаборанта на ПМФ-у Бања Лука.

Без подршке и разумевања моје породице овај рад не би било могуће реализовати. Супрузи Бранки, кћеркама Анђели и Марији дугујем највећу захвалност на показаном разумевању и непрестаној подршци при изради докторске дисертације. Овом приликом желим да се захвалим своме оцу Божи на подршци у теренском раду, мајци Госпави, супрузиним родитељима Миливоју и Мари и брату Саши на разумевању и подршци.

Захвалност дугујем и свим својим сарадницима, колегама и пријатељима који нису поменути, а који су својом пажњом помогли у изради ове докторске дисертације.

## Списак слика

- Слика 1.** Низ распада  $^{232}\text{Th}$
- Слика 2.** Низ распада  $^{238}\text{U}$
- Слика 3.** Места продирања радона у куће
- Слика 4.** Општа шема понашања радона и радонових потомака у затвореним просторијама
- Слика 5.** Однос концентрације потомака радона и радона у нуклеационој моди у функцији јачине вентилације
- Слика 6.** Однос концентрације потомака радона у акумулационој моди и концентрације радона у функцији јачине вентилације
- Слика 7.** Однос концентрације потомака радона у грубој моди и концентрације радона у функцији јачине вентилације
- Слика 8.** Зависност зауставне моћи од енергије јона.
- Слика 9.** Случај када јон упада под правим углом
- Слика 10.** Општији случај када је упадни угао мањи од  $90^\circ$
- Слика 11.** Cr -39 детектор
- Слика 12.** Гама 1 детектор
- Слика 13.** Тасл систем (TASL system)
- Слика 14.** Политрак систем (Politrack system)
- Слика 15.** Трагова честица на микро филму
- Слика 16.** Детектор Cr -39 (ПАДУЕТ)
- Слика 17.** LR 115 детектори (Direct Radon Progeny Sensors/Direct Thoron Progeny Sensors –DRPS/DTPS)
- Слика 18.** Шема унутрашњости ређаја Rad 7
- Слика 19.** Уређај Rad 7
- Слика 20.** CDI-06
- Слика 21.** Шема рада Цилиндрични детектор и спектрометар јона (CDIS)
- Слика 22.** Географска карта Републике Српске (Бања Лука)
- Слика 23.** Географска мапа означених локација узрокованих школа (лево на слици) у градском подручју Бања Луке и концентрације узрокованих школа (десно на слици)

- Слика 24а.** Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама са CRn (1) детектором
- Слика 24б.** Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама са CRn (2) детектором
- Слика 24в.** Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама са CRn (3) детектором
- Слика 25.** Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама на истим локацијама са три типа детектора
- Слика 26.** Релативноодступање концентрације радона мерена са три типа детектора у функцији од средње концентрације радона
- Слика 27.** Фреквенције измерених концентрације радона фитоване са лог-нормалном функцијом
- Слика 28.** Средње вредности (са 95% интервалом поверења) концентрације радона мерене у 44 просторија 25 школа Бања Луке
- Слика 29.** Средње вредности ln трансформисане концентрације радона у различитим просторијама
- Слика 30.** Средње вредности ln трансформисане концентрације радона у различитим просторијама на различитим спратовима
- Слика 31.** Средње вредности ln трансформисане концентрације радона у зависности од грађевинског материјала
- Слика 32.** Хистограм измерене концентрације торона фитован лог-нормалном функцијом и p-р-график ln трансформисане концентрације торона фитован нормалном дистрибуцијом
- Слика 33.** Измерена концентрација торона у школама
- Слика 34.** Средње вредности ln трансформисане концентрације торона са у различитим просторијама на различитим спратовима.
- Слика 35.** Средње вредности ln трансформисане концентрације торона у зависности од врсте грађевинског материјала
- Слика 36.** Однос ln концентрације торона и радона у школама
- Слика 37.** Хистограми EERC и EETC фитован лог-нормалном функцијом и график ln трансформисане EERC и EETC фитован нормалном дистрибуцијом.

- Слика 38.** У случају значајне статистичке корелације, веза међу величинама је моделирана линеарном функцијом (црна пуна линија). На истом графику пуна сива линија представља 95% интервал поверења средње вредности, а испрекидана црна линија означава 95% интервал поверења модела.
- Слика 39.** У случају значајне статистичке корелације, веза међу величинама је моделирана линеарном функцијом (црна пуна линија). На истом графику пуна сива линија представља 95% интервал поверења средње вредности, а испрекидана црна линија означава 95% интервал поверења модела.
- Слика 40.** Средње измерене концентрације радона и торона и њихових распадних производа мерене на различитим спратовима у кућама и школама
- Слика 41.** Средње измерене концентрације радона и торона и њихових распадних производа мерене на различитим спратовима у кућама и школама
- Слика 42.** Поређење средњих вредности концентрација радона и торона и њихових продуката распада у кућама и школама
- Слика 43.** Поређење концентрације радона у школама и кућама на различитим спратовима
- Слика 44.** Поређење EERC школама и кућама на различитим спратовима
- Слика 45.** Поређење концентрације радона (са 95% интервалом поверења) у школама и кућама у зависности од грађевинског материјала
- Слика 46.** Средње концентрације торона у школама и кућама груписане по врсти грађевинског материјала
- Слика 47а.** Вредности фактора равнотеже за радон у кућама
- Слика 47б.** Вредности фактора равнотеже за торон у кућама
- Слика 48.** Поређење фактора равнотеже радонових потомака по спратовима
- Слика 49.** Графички приказ недељних концентрација радона измерених у школама
- Слика 50.** Хистограми концентрације радона измерене помоћу уређаја RAD 7
- Слика 51.** Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона (са 95% границама значајности)
- Слика 52.** Графички приказ концентрације радона измерене помоћу активне и пасивне методе
- Слика 53.** Хистограми концентрације радона измерене помоћу активне и пасивне методе

- Слика 54.** Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона (са 95% границама значајности)
- Слика 55.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Младен Стојановић Бронзани Мајдан)
- Слика 56.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Иво Андрић Центар)
- Слика 57.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Бранислав Нушић Топлице)
- Слика 58.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Свети Сава Лаш)
- Слика 59.** Дијаграм концентрација радона ( ОШ. Бранко Радичевић Старчевица)
- Слика 60.** Дијаграм промене концентрације негативних (●) и позитивних (®) јона и радона (\*) у времену са коефицијентима корелације (R) и детерминације ( $R^2$ ), мерених један дан у ОШ. Бранислав Нушић Топлице
- Слика 61.** Дијаграм промене концентрације негативних (●) и позитивних (®) јона и радона (\*) у времену са коефицијентима корелације (R) и детерминације ( $R^2$ ), мерених 7 дана у ОШ Змај Јова Јовановић Хисете
- Слика 62.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Десанка Максимовић Драгочај)
- Слика 63.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Јован Цвијић Центар)
- Слика 64.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Ђура Јакшић Шарговац)
- Слика 65.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Доситеј Обрадовић Мејдан)
- Слика 66.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Иван Горан Ковачић Буцак)
- Слика 67.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Јован Дучић Залужани)
- Слика 68.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Милутин Бојић Поткозарје)
- Слика 69.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Мирослав Антић Бистрица)
- Слика 70.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Станко Ракита Врбања)
- Слика 71.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Вук Караџић Борик)
- Слика 72.** Дијаграм концентрација радона (О.Ш. Ћирило и Методије Пискавица)
- Слика 73.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Борислав Станковић Буцак)
- Слика 74.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Георгије С. Раковски Нова Варош)
- Слика 75.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Бранко Ћопић Борик)
- Слика 76.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Петар Кочић Хан Кола)
- Слика 77.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Петар Петровић Његош Мејдан)
- Слика 78.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Војислав Илић Крупа на Врбас)

**Слика 79.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Змај Јова Јовановић Хисете)

**Слика 80.** Дијаграм концентрација радона (ОШ. Алекса Шантић Малта)

**Слика 81.** Дијаграм концентрација радона (ОШ.Милан Ракић Карановац)

## Списак табела

- Табела 1.** Приказ удела појединих извора зрачења у просечној годишњој ефективној дози
- Табела 2.** Физичке особине  $^{222}\text{Rn}$  и његових краткоживућих потомака
- Табела 3.** Коефицијент дифузије,  $D$  за радон.
- Табела 4.** Подела јона у атмосфери по величини
- Табела 5.** Врста и број детектора који су постављени у школе и куће
- Табела 6.** Дескриптивна статистика вредности мерења радона и торона у школама
- Табела 7.** Тестирање значајности разлике међу спареним концентрацијама радона измерених на истој локацији са три типа детектора Ефекат је значајан за  $p < 0.05$
- Табела 8.** Коефицијенти корелације три типа детектора
- Табела 9.** Граничне вредности релативног одступања (ЕРА, 1993)
- Табела 10.** Параметри лог-нормалне функције, вероватноћа грешке ( $p$ ) и значајност KS теста за четири групе мерења концентрације радона.
- Табела 11.** Дескриптивна статистика концентрације радона у школама Бања Луке
- Табела 12.** Дескриптивна статистика концентрације радона (спратност)
- Табела 13.** Дескриптивна статистика (просторије)
- Табела 14.** Дескриптивна статистика (грађевински материјал)
- Табела 15.** Дескриптивна статистика концентрација торона (спратност, намена просторије и врста грађевинског материјала)
- Табела 16.** Резултати мерења: концентрације торона и  $C_{\text{Tn}}/C_{\text{Rn}}$  из истраживања у Словенији објављени у међународним часописима.
- Табела 17.** Параметри линеарне регресије и корелације између концентрације радона, торона и њихових продукти распада.
- Табела 18.** Дескриптивна статистика радона и торона (куће)
- Табела 19.** Параметри линеарне регресије и корелације између концентрација радона, торона и њихових продуката распада у кућама.
- Табела 20.** Дескриптивна статистика радона и торона у школама и кућама
- Табела 21.** Параметри лог-нормалне и нормалне функције



<b>Табела 22.</b>	Дескриптивна статистика у школама и кућама (грађевински материјал)
<b>Табела 23.</b>	Дескриптивна статистика фактора равнотеже за радон и торон
<b>Табела 24.</b>	Параметри за израчунавање доза
<b>Табела 25.</b>	Процењена ефективна годишња доза од радона у кућама и школама
<b>Табела 26.</b>	Процењена ефективна годишња доза од торона у школама и кућама
<b>Табела 27.</b>	Резултати мерења концентрације радона у школама уређајем Rad 7
<b>Табела 28.</b>	Дескриптивна статистика резултата мерења уређајем Rad 7
<b>Табела 29.</b>	Параметри лог-нормалне функције, вероватноћа грешке ( $p$ ) и значајност KS теста за три групе мерења концентрације радона. $C_{Rn}(7)$ , $C_{Rn}(5)$ и $C_{Rn}(2)$
<b>Tabela 30.</b>	Резултати мерења активном и пасивном методом
<b>Табела 31.</b>	Дескриптивна статистика измерених резултата активном и пасивном методом
<b>Табела 32.</b>	Параметри лог-нормалне функције, вероватноћа грешке ( $p$ ) и значајност KS теста за две групе мерења концентрације радона
<b>Табела 33.</b>	Коефицијенти детерминације
<b>Табела 34.</b>	Распоред Cr-39 детектора - школе
<b>Табела 35.</b>	Распоред Cr-39 детектора - куће
<b>Табела 36.</b>	Распоред гама 1 детектора - школе
<b>Табела 37.</b>	Распоред Cr -39 (радует детектори) - школе
<b>Табела 38.</b>	Распоред Cr -39 (радует детектори) - куће
<b>Табела 39.</b>	Распоред LR 115 детектори (DRPS/DTPS) - школе
<b>Табела 40.</b>	Распоред LR 115 детектори (DRPS/DTPS) - куће

### Неке ознаке које се појављују у тексту

$C$	Концентрација радона
$D_{\text{eef}}$	Ефективни коефицијент дифузије радона
$\lambda$	Константа радиоактивног распада радона
$\Phi$	Карактеристика извора
$\lambda_i$	Константа распада
$\lambda_v$	Коефицијент вентилације
$A$	Активност радиоактивног извора
$\tau$	Средње време живота
$D$	Апсорбована доза
$H$	Еквивалентна доза
$H_e$	Ефективна доза
$C_e$	Равнотежина еквивалентна концентрација радона
$C_o$	Стварна концентрација радона у ваздуху
$n_e$	Концентрација електрона
$m$	Маса електрона
$W_{\text{max}}$	Максимални трансфер енергије
$v$	Брзина јона
$I$	Средњи потенцијал јонизације
$J$	Примарна јонизација
$V_t$	Брзина нагризања дуж трага тешке наелектрисане честице
$V_b$	Брзине којом растварач скида површину
$\rho$	Густине трагова
$\tau$	Време распада радона,
$t$ и $t_e$	Времена експонирања
$K$	Калибрациони коефицијент

**Скраћенице које се појављују у тексту**

**ICRP International Commission on Radiological Protection**

(Међународна комисија за заштиту од зрачења)

**UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**

(Научни комитет Уједињених нација за ефекте атомског зрачења)

**NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements**

(Национални савет за заштиту и мерења од зрачења)

**NEA Nuclear Energy Agency Group of Experts**

(Национални савет за истраживање)

**AMAD Activity Median Aerodynamic Diameter**

(Активносна медијана аеродинамичког дијаметра)

**PAEC Potential Alpha Energy Concentration**

(Концентрација потенцијалне алфа енергије)

**WL Working Level**

(Радни ниво)

**WLM Working Level Month**

(Месечни радни ниво)

**EEC Equilibrium Equivalent Concentration**

(Равнотежна еквивалентна концентрација радона)

**EETC Equilibrium Equivalent Concentration Thoron**

(Равнотежна еквивалентна концентрација торона)

**EERC Equilibrium Equivalent Concentration Radon**

(Равнотежна еквивалентна концентрација радона)

**GPS Global Positioning System**

(Глобални позициони систем)

**RADUETCr-39 детектор**

**DRPS/DTPS Direct Radon Progeny Sensors/Direct Thoron Progeny Sensors**

(Директни сензор за потомке радона/ директни сензор за потомке торона)

## САДРЖАЈ

УВОД.....	1
1. РАДОН ( $^{222}\text{Rn}$ ).....	5
1.1. Физичке и хемијске карактеристике $^{222}\text{Rn}$ .....	5
1.2. Извор радона.....	8
<i>1.2.1. Земља и стеновито тло испод објеката као извор радона .....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2. Грађевински материјал као извор радона и начини уласка у просторије</i>	<i>11</i>
1.3. Транспорт радона .....	13
1.4. Понашање радонових потомака у затвореним просторијама .....	16
1.5. Основне величине у радијационој физици .....	24
<i>1.5.1. Величине које карактеришу контаминацију ваздуха радоном .....</i>	<i>25</i>
1.6. Процена ефективне дозе од радона.....	27
1.7. Алфа зрачење и атмосферски јони као последица распада радиоактивних гасова	28
2. ОПШТЕ МЕТОДЕ И ТЕХНИКЕ МЕРЕЊА РАДОНА.....	30
2.1. Пасивна мерна техника .....	30
<i>2.1.1. Примери детекције код чврстих траг детектора.....</i>	<i>32</i>
<i>2.1.2. Геометрија развоја трага .....</i>	<i>34</i>
2.2. Активна метода мерења радона .....	37
3. МЕТОДЕ И ТЕХНИКЕ ПРИМЕЊЕНЕ У ОВОМ РАДУ .....	39
3.1. Пасивне методе мерења радона.....	39
<i>3.1.1. Детектори за мерење радона .....</i>	<i>39</i>
<i>3.1.2. Детектори за мерење радона и торона .....</i>	<i>42</i>
3.2. Активна метода мерења радона.....	44
3.3. Мерење концентрације атмосферских јона .....	47
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД .....	50
4.1. Избор локације.....	50
4.2. Дизајн теренског рада.....	52
4.3. Статистика обраде резултата .....	54
5. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА .....	56

5.1. Концентрација радона, торона и продуката распада у школама .....	56
<b>5.1.1. Концентрација радона у школама</b> .....	56
5.1.1.1 Поређење резулата концентрације радона измерених са различитим детекторима .....	56
5.1.1.2. Утицај објекта на концентрацију радона .....	63
<b>5.1.2. Концентрација торона у школама</b> .....	71
5.1.2.1. Однос концентрације торона и радона .....	75
<b>5.1.3. Равнотежна еквивалентна концентрација радона и торона у школама Бања Луке (EERCu EETC)</b> .....	77
<b>5.1.4. Корелације концентрација у школама</b> .....	79
5.2. Концентрација радона, торона и њихових краткоживећих потомака у кућама Бања Луке .....	81
<b>5.2.1. Корелације концентрација радона у кућама</b> .....	83
<b>5.2.2. Утицај спрата на мерене концентрације радона, торона и продуката распада</b> .....	85
5.3. Концентрација радона, торона и њихових краткоживећих потомака у школама и кућама града Бања Луке .....	86
5.4. Фактори равнотеже за радон и торон .....	94
<b>5.4.1. Процена ефективне дозе која потиче од радона и краткоживећих потомака у школама и кућама</b> .....	97
<b>5.4.2. Процена дозе за концентрацију торона у школама и кућама</b> .....	99
5.5. Мерење концентрација радона активном методом (RAD 7) .....	100
<b>5.5.1. Мерење концентрације радона у школама</b> .....	100
5.5.1.1. Резултати мерења концентрације радона активном методом (Rad7) и пасивном методом .....	104
5.5.1.2. Временска варијација измерених концентрација радона .....	109
5.6. Концентрације јона и корелације са концентрацијом радона .....	113
<b>6. ЗАКЉУЧЦИ</b> .....	115
<b>7. ЛИТЕРАТУРА</b> .....	119
<b>8. ПРИЛОЗИ</b> .....	128

## УВОД

Излагање радону и његовим потомцима у ваздуху, доприноси више од 50% годишњој ефективної дози коју становништво прими из природних извора јонизујућих зрачења (UNSCEAR, 2000) и представља један од главних ризика излагања јонизујућим зрачењима из природе. У Табели 1. приказано процентуално учешће појединих извора зрачења у годишњој ефективної дози.

Табела .1 Приказ удела појединих извора зрачења у просечној годишњој ефективної дози

Извор радона	Удео (%)
Радон из земљишта	50
Озрачивање у медицинске сврхе	14
γ зрачење из земљишта и грађевина	13,5
Космичко зрачење	12
Храна и пиће	10
Остало	0,5

Светска здравствена организација (SZO-World Health Organization-WHO) је сврстала радон у групу доказаних хуманих канцерогена и као други најважнији узрок рака плућа, после пушења (WHO 2009, Selected Topics 2010).

Радон настаје алфа радиоактивном трансформацијом радијума у природном радиоактивном распаду серије урана  $^{238}\text{U}$  у земљиној кори. Одатле мигрира на површину помоћу механизма дифузије и адвекције (Nazaroff et.al., 1988). На кретање радона утичу бројни геофизички и хидрометеоролошки чиниоци. Иницијално радон и његови потомци су позитивно наелектрисани јони метала који се брзо неутралишу, било због међусобне интеракције или због интеракције са молекулима ваздуха, стварајући "кластере" (clusters). Касније, зависно од услова, они се припајају на аеросоле. Краткоживећи потомци се појављују у ваздуху као радиоактивни аеросоли бимодално распоређени на честице величине од 1-10 nm (неприпојена) и на честице величине од 200-800 nm (припојена) фракција краткоживећих потомака. Брзина реконструкције фракција неприпојених или припојених краткоживећих потомака углавном зависи од влажности ваздуха, броја, концентрације и величине честице аеросола, брзине кретања ваздуха и активности особа у затвореним просторијама у којима бораве и раде. Током дисања, ваздух се са радоном

удише, у плућима се радон распада на краткоживеће потомке који се задржавају делимично на зидовима и слузокожи дисајних органа, ослобађајући енергију при свом радиоактивном распаду. Ова енергија се апсорбује у околна ткива, потенцијално га оштећују и повећавајући вероватноћу настајања малигних обољења плућа.

Радон је после пушења најзначајнији узрочник болести канцера плућа, а вероватноћа обољевања расте у комбинацији са дуванским димом (WHO, 2009). Ово је разлог за истраживање концентрације радона у ваздуху у затвореним просторима ("indoor radon"). Аритметичка средина активности радона у затвореном простору за читаву планету износи  $37 \text{ Bq/m}^3$ . На основу препорука Међународне комисије за заштиту од зрачења (ICRP) за ниво противделовања (action level) узима  $200 \text{ Bq/m}^3$  за новије објекте и  $400 \text{ Bq/m}^3$  за остале. Просечна годишња доза за становништво на светском нивоу од свих извора зрачења процењена је  $2,4 \text{ mSv}$ , а може достићи и вредности преко  $100 \text{ mSv}$ . Највећа светска вредност ефективне дозе од природних извора је нађена у граду Рамсар у Ирану ( $100 \text{ mSv/godini}$ )

Предмет овог рада је мерење концентрација радиоактивних гасова радона ( $^{222}\text{Rn}$ ), торона ( $^{220}\text{Rn}$ ) и њихових продуката распада у школама и кућама на подручју града Бања Луке и околине пасивном и активном методом мерења. У овом раду мерење активном методом вршено помоћу детектора радона RAD 7 у 25 школа. За примену пасивне методе коришћени су интеркалибрисани чврсти нуклеарни траг детектори: CR-39 (радон комерцијални назив TASL), Гама 1 (радон), CR-39 (радон, торон комерцијални назив радует) и LR115 (DRPS директни сензори за потомке радона/DTPS директни сензори за потомке торона).

Циљеви дисертације су:

1. измерити концентрације  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  у школама и кућама у пречнику 2 km око школа, на тај начин би третирали подручје са великим бројем становника, пре свега деце;
2. одредити вредност ефективне годишње дозе коју прима становништво града Бања Луке од радона и његових краткоживећих потомака,
3. поређење више типова детектора у истим условима мерења,
4. измерити концентрације  $^{222}\text{Rn}$  помоћу уређаја Rad 7 ,
5. поређење резултата пасивне и активне методе,

6. одређивање корелације распада радона, његових краткоживећих потомака и атмосферских јона,
7. да ова мерења буду први корак ка изради радонске мапе Републике Српске.

Мерење пасивном методом обављено јеу 25 школа и 85 кућа (110 просторија) Града Бања Луке, при чему је постављено укупно 278 траг детектора. Време излагања траг детектора је било шест месеци и годину дана, а мерење Rad 7 уређајем вршено је континуирано 7 дана (очитавање концентрације  $^{222}\text{Rn}$  свака 2 сата, укупно 84 очитавања) на свакој локацији.

## РАСПОРЕД МАТЕРИЈАЛА ПО ГЛАВАМА

Рад се састоји од два дела:

- а) опште разматрање и
- б) теоријско-експериментални део

Општи део је без оригиналног научног доприноса аутора, има монографски карактер и даје преглед стања у овој области. Општи део се састоји од три главе које описују појмове неопходне за разумевање рада и технологије.

У првој глави је описан радон као радиоактивни гас, извори радона где се посматра тло испод објекта и грађевински материјали од којих су објекти саграђени. Затим је описан транспорт радона на површину земље и начин уласка радона у просторије као и понашање радонових потомака у затвореним просторијама. У овој глави су дефинисани основни појмови у радијационој физици, као и величине које карактеришу контаминацију ваздуха радоном. У првој глави је описан начин на који се врши процена ефективне дозе. У овој глави су још описана  $\alpha$  зрачења и атмосферски јони.

У другој глави су описане опште методе и технике мерења радона. Описана је пасивна метода у којој се говори о нуклеарним траг детекторима, тј: њихова историја, физичко хемијске карактеристике и детаљан опис геометрије раста трага. У оквиру геометрије раста трага разматрани су случајеви упада честица у детектор под правим и косим угловима. У овој глави је описана и активна метода мерења радона и најчешће коришћени уређаји: AlphaGuard PQ 2000PRO, Rad 7 и Radon Scout.

У трећеј глави су описани уређаји који су кориштени при мерењу радона. За пасивну методу мерења су коришћени чврсти нуклеарни траг детектори: CR-39 (радон



комерцијални назив TASL), Гама 1 (радон), CR-39 (радон, торон комерцијални назив радует) и LR115 (DRPS директни сензори за потомке радона/DTPS директни сензори за потомке торона). За активну методу мерења коришћен је и описан уређај за мерење радона Rad 7 (DURRIDGE) тзв. континуални радон детектор. У овој глави су описани уређаји за мерење атмосферских јона цилиндрични детектор јона CDI-06.

Други дио рада, теоријско-експериментални представља оригинални научни допринос аутора.

У четвртој глави је описан избор локације на којој су вршена мерења. Мерење радона на подручју Бања Луке је вршено први пут и њиме је обуваћен велики дио популације у Републици Српској. У овој глави су описана места мерења (школе и куће) као и број, врста детектора који су коришћени у објектима. Такође је описана и статистика која је примењивана при обради резултата мерења.

У петој глави су описани резултати мерења. Анализирана је концентрација радона у школама, затим степен корелације концентрације радона у зависности од четири типа детектора. Анализиран је утицај спратност, грађевинског материјала и намене просторије на концентрацију радона. На исти начин је анализирана и концентрација торона у школама. У резултатима се анализира концентрација радона и торона за куће, као и анализа за школе и куће заједно. У овој глави је анализирана и годишња доза зрачења коју становништво прими од радона. У петој глави су обрађени и резултати мерења радона активном методом у 25 школа, као и поређење резултата мерења радона пасивном и активном методом. На крају у овој глави су дати резултати корелације између радона, његових продуката распада и атмосферских јона за две школе.

У закључку је дат преглед резултата и достигнућа рада. Дискутовани су резултати у оквиру постојећих експерименталних и теоријских података, као и идеје за нека нова мерења.

## 1. РАДОН ( $^{222}\text{Rn}$ )

### 1.1. Физичке и хемијске карактеристике $^{222}\text{Rn}$

Радон је једини племенити гас у природи који је радиоактиван, то је гас без боје и мириса. Радон је најтежи гас који се јавља у природи у стандардним условима температуре и притиска (7 пута тежи од ваздуха) и скоро је потпуно хемијски инертан. Његова растворљивост у води је веома висока и смањује се са порастом температуре [Kofler, 1908].

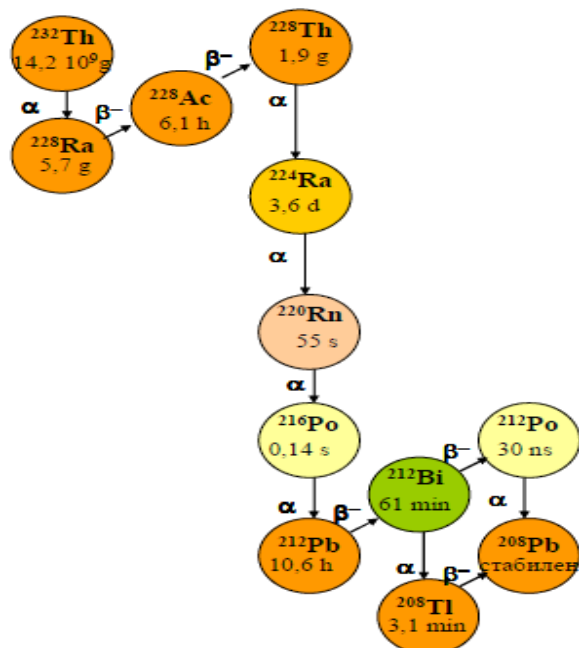
Хемијске особине радона су релативно непознате, [Cotton&Wilkenson, 1999] ипак је познато да реагује са кисеоником (O) и флуором (F). Проучавањем племенитих гасова процењено је да радон има атомски радијус 0,235nm. Овакав велики радијус утиче на пренос радона до површине тла помоћу присутних гасова (носиоци радона -угљендиоксид  $\text{CO}_2$  и метан  $\text{CH}_4$ ) [Vaugues, 1993].

Генетска веза са ураном чини га корисним у трагању за рудом урана, а хемијска инертност га чини корисним трасером геофизичких процеса, који доводе до кретања гаса кроз земљу (предвиђање земљотреса и вулканских ерупција). Са друге стране, радиоактивност га чини штетним по здравље.

Радон настаје радиоактивном трансформацијом  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и постоји у различитим концентрацијама у свим материјалима из земље. Постоје три изотопа радона у природи:

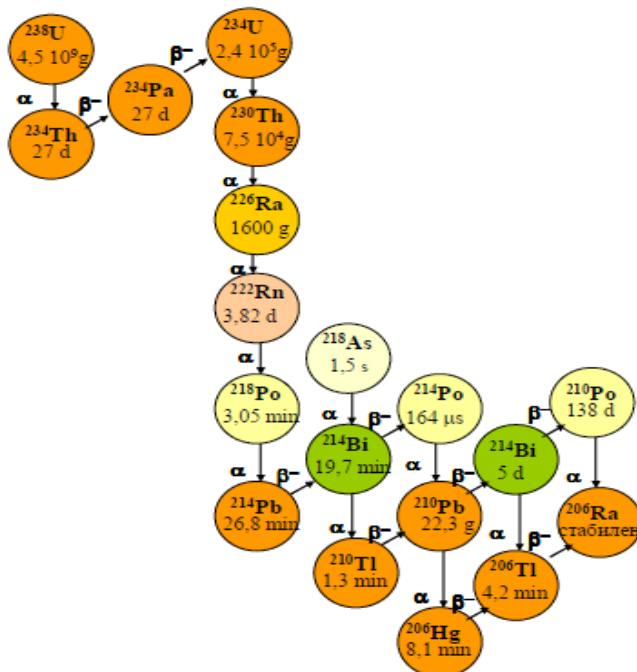
- радон  $^{219}\text{Rn}$ , познат под именом актинон и потиче од низа  $^{235}\text{U}$ ;
- радон  $^{220}\text{Rn}$ , познат под именом торон и потиче од низа  $^{232}\text{Th}$  (Слика 1);
- радон  $^{222}\text{Rn}$  и потиче од низа  $^{238}\text{U}$  (Слика 2).

Због ниске концентрације радона  $^{235}\text{U}$  у земљи и кратког периода полуживота  $^{219}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,96 \text{ s}$ ) овај изотоп не доприноси значајно укупним дозама зрачења. Радон  $^{220}\text{Rn}$  има кратак период полураспада ( $T_{1/2} = 55,6 \text{ s}$ ), ипак његово присуство се не може занемарити.



Слика 1. Низ распада  $^{232}\text{Th}$

Како  $^{222}\text{Rn}$  има релативно дуг период полураспада (3,82 дана) овај изотоп је најзначајнији природни извор зрачења у животној средини.



Слика 2. Низ распада  $^{238}\text{U}$

Густина радона на 0 °C је 0,00973 g/cm<sup>3</sup>, а температура топљења је -71 °C, тачка кључања је -61,8 °C, критична температура је 104,4 °C а критични притисак износи 63,2 x 10<sup>5</sup> Pa [Gernich, 1996]. <sup>222</sup>Rn има четири краткоживећа потомка: <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi и <sup>214</sup>Po. Оба полонијума се распадају  $\alpha$  распадом, док су бизмут и олово распадају  $\beta$  и  $\gamma$  распадом [Eisenbud, 1987]. Неке од физичких особина <sup>222</sup>Rn приказани су у Табели 2. <sup>214</sup>Bi бифурцира, тј., распада се и алфа и бета распадом. Бифуркација постоји и у осталим природним радиоактивним низовима.

Табела 2. Физичке особине <sup>222</sup>Rn и његових краткоживећих потомака

Неке од физичких особина <sup>222</sup> Rn и његових краткоживећих потомака					Број атома	
Елемент	Историјски симбол	Основно зрачење(s)	Енергија распада (MeV)	Време полураспада	( $\mu$ Ci) <sup>-1</sup>	(Bq) <sup>-1</sup>
<sup>226</sup> Ra	Ra	A	4.8	1,620 god	$2.7 \times 10^{15}$	$7.4 \times 10^{10}$
<sup>222</sup> Rn	Rn	A	5.5	3.82 dan	$1.8 \times 10^{10}$	$4.8 \times 10^5$
<sup>218</sup> Po	RaA	A	6.0	3.05 min	$9.77 \times 10^6$	$2.6 \times 10^2$
<sup>214</sup> Pb	RaB	$\beta, \gamma$	1.0 max	26.8 min	$8.58 \times 10^7$	$2.3 \times 10^3$
<sup>214</sup> Bi	RaC	$\beta, \gamma$	3.3 max	19.7 min	$6.31 \times 10^7$	$1.7 \times 10^3$
<sup>214</sup> Po	RaC	A	7.7	164 $\mu$ s	8.8	$2.4 \times 10^{-4}$

О штетности радона могу се наћи докази из времена пре његовог открића. Агриколини рукописи из XV века сведоче о веома високом морталитету рудара у подземним рудницама и планинама Ерц. Главни узрок високе смртности су били болести респираторних органа. Крајем XV века почела је експлоатација руде сребра у области Шнеберг у Саксонији, на северним обронцима Рудних планина. Истовремено је на јужним обронцима ових планина у месту Јоахимов отворен површински коп руде сребра. Врло брзо, већ почетком XVI века, у овој области уочена је велика стопа смртности млађих рудара услед болести респираторних органа. Хартинг и Хесе су 1879. године дали извјештај о патолошким студијама урађеним на рударима у немачком делу области Шнебегер и документовали опаност од добијања рака плућа. Почетком XX века, 1901. године, Елстер и Геител су извршили прва мерења радона у поменутих областима и утврдили његов висом садржај у ваздуху, од 70 kBq/m<sup>3</sup> до 500 kBq/m<sup>3</sup>. Касније патолошке студије су показале да рудари имају повишен број случајева примарног канцера плућа [Arnstein, 1913; Rostoski et. al., 1926]. Пирчан и Сикил 1932. године указују на радон као

главни узрочник рака плућа, али се ово мишљење не усваја у потпуности све док није боље разјашњена биолошка база и карциногенеза услед повишене концентрације радона и док нису извршене додатне епидемиолошке студије код других група изложених рудара [Seltser, 1965; Huper, 1966; Lundin et.al.,1971].

Значајан допринос о утицају радона на здравље људи даје Бале (1951), у свом меморандуму, где приказује да потомци радона, пре него сам радон, доприносе  $\alpha$  озрачивању респираторног тракта.

Постоји преко 20 различитих студија о повезаности радона и рака плућа код рудара у подземним коповима [Samet, 1989], а спроведен је и низ експерименталних студија о припајању и задржавању радонових потомака у плућима, што је омогућило квантитативну процену дозе зрачења у бронхијалном епителу, потекле од одређене концентрације радонових потомака у ваздуху. На основу дугогодишњих истраживања спроведених у рудницима у САД, Чешкој, Словачкој, Француској, Канади, Кини, Британији и Шведској и студија утврђених на основу њих, утврђен је квантитативни однос између излагања радону и ризика од појаве рака плућа [NCR, 1988; Lubin, 1988; Samet, 1989].

Студије о штетности радона су касније проширене и на становништво имајући у виду да људи у развијеним земљама око 80% времена проводе у затвореним просторијама. Краје 80-ти почиње опсежније мерење радона у стамбеним објектима, што је објављено у публикацијама UNSCEAR-а [UNSCEAR, 1982; 1988; 1993].

## **1.2. Извор радона**

Радонови изотопи настају у минералима распадом  $^{226}\text{Rn}$ , односно урана  $^{238}\text{U}$ , што значи да његова концентрација зависи од садржаја урана у земљи и стенама. Удео урананијума у минералима се креће од  $<3 \cdot 10^{-12}$  у кварцу, до 0,88 у уран диоксиду. Различити минерали садрже различите концентрације урана. У извесним минералима као што су циркон ( $\text{ZrSiO}_4$ ), апатит ( $\text{Ca}_5(\text{F,Cl})(\text{PO}_4)_3$ ), сфен ( $\text{CaTiSiO}_5$ ), аланит [ $\text{H}(\text{Ca,Fe})(\text{Al,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{13}$ ] често га има у повишеним концентрацијама.

Услед својих хемијских особина, које му дозвољавају кретање у раствореном стању, у природи се налази у ниским концентрацијама: апсорбован у минералима у земљи, најчешће стенама богатим калцијумом, гвожђем, у пукотинама са магнезијумом, или

растворен у водама океана, мора, језера и река. Налази се у материнским и другим минералима, а најчешће су то магматске стене богате силицијумом, неке форме гранита и сенита, еруптивне риволит и порофил, вулканске стене пегматит и аплит [Fleischer, 1988]. Типични и најзаступљенији уранов минерал је уранит, црни или тамносмеђи минерал велике густине, а по хемијском саставу је уранов оксид. Оксиди минерала садрже већу концентрацију урана него основни [Percov, 1964]. Изложени деструктивним процесима минерали ослобађају радиоактивне изотопе. Када су стене изложене ерозији, ослобађају се минерална зрна са ураном, а делом и радијумом која бивају апсорбоване честицама глине и могу се транспортовати водом и таложити. На тај начин, глина и глинени шкриљци садрже већу концентрацију урана и радијума него друге седиментне стене, јер се добро апсорбују на аморфним телима. Међу седиментним минералима најмање су радиоактивни чисти органски и хемијски талози (камена со, гипс, анхидрит, кречњак, доломит, чисти кварц, кварцни песак и различите силицијумске форме) [Durrani&Ilić, 1997]. Минерали потомака урана у природи не постоје, већ се радијум налази у расејаном облику у природи и може се премештати путем хемијских реакција растварање-таложење [Dongarra&Martinelli, 1993]. Промену концентрације радона могу изазвати физички и хемијски процеси: промене у температури, залеђивање воде у пукотинама минерала, као и деловање биљних и животињских организама. На промену концентрације утичу ветар, морска вода и сила земљине теже. Ефекат дробљења минерала водом чини да се концентрације урана и радијума смањује, до веома малих вредности у финим гранулама земље као што је кварцни песак.

### ***1.2.1. Земља и стеновито тло испод објеката као извор радона***

Земља и стеновито тло испод и поред кућа су главни извори радона у затвореним просторијама, посебно ако су стене дубоко у земљи (>100 m) [Jonson, 1991]. Радон се пробија према површини земље, излази и меша са ваздухом, настављајући пут према атмосфери. Ако се погледају извори зрачења на Земљи (Табела 1.) у просечној годишњој ефективној дози, може се закључити да 50% отпада на радон из земљишта, а сви остали извори заједно чине око 50% [UNSCEAR, 2000].

Јаловина из уранских рудника и остаци фосфатних рудника доприносе повећању глобалне количине радона. Такође, остаци угља и производи сагоревања, као и природни гас, сви понаособ у мањој мери доприносе повећању нивоа радона у атмосфери [NCRP, 1984]. Угаљ и природни гас приликом сагоревања ослобађају радон у ваздуху. Остаци угља, као што је пепео, у врло малим количинама доприносе повећању радона у атмосфери. Неки грађевински материјали такође испуштају извесне количине радона, при чему неки, који имају висок садржај радијума, могу да испуштају значајне количине.

Са дозиметријског аспекта најзначајнији дугоживећи изотоп радона је  $^{222}\text{Rn}$ . Атом радијума, који му непосредно претходи у ланцу распада урана, везан је у кристалној решетки материјала у коме се налази. Са друге стране, атом радона напушта место формирања и прелази у атмосферу. Због овога у ваздуху постоји сталан "доток" радона из тла и материјала присутних на земљи, процесима дифузије и конвекције. Због релативно дугог времена полуживота, атом радона може да пређе велико растојање од места стварања, због чега често не постоји једноставна корелација између концентрације радона у ваздуху (или у води) и концентрације радијума у тлу.

Зависно од: врсте, влажности, порозности и гранулације тла како и садржаја урана у њему и концентрација радона на дубини од 1 m може бити различита. Ако је земља порозна, радон створен у стенама које леже у доњим слојевима лако се транспортује навише кроз земљу. Присуство подземних вода, влажна глина или непорозна земља су средине, које мање или више спречавају транспорт радона навише. Посебан допринос извору радона дају пукотине и фрактуре у слојевима, преко којих се гас транспортује. Не ретко се дешава да у зони фрактура проблем са радоном има само понеки објект који лежи директно на фрактури. Ексхалирајући са земљине површине у слободну атмосферу, радон се брзо распростире под утицајем вертикалне конвекције и турбулентног мешања, због чега му се концентрација смањује. Изнад површине земље, радон је присутан на местима где му је омогућена ексхалација. То значи да је изнад површина које су под водом присуство радона занемарљиво. Када радон достигне висину од 1 m изнад површине тла, његово кретање је одређено факторима атмосферске стабилности. Сезонске промене (температура, притисак, влажност, ветар) утичу на факторе атмосферске стабилности. Максималну концентрацију радона треба очекивати у јесен или на почетку зиме, јер је тада највиши ваздушни притисак и нема пуно померања ваздушних маса,

док се минимум концентрације може очекивати у пролеће. Дневне варијације концентрације радона су такође везане за атмосферске промене, где у раним јутарњим сатима присутан максимум концентрације због температурне инверзије која спречава вертикално струјање ваздуха. Ујутро долази до постепеног загревања тла и до издицања ваздуха са површине тла, и тада долази до смањења концентрације радона. Касно поподне расте стабилност атмосфере и то доводи до пораста концентрације радона. Када доспе у затворени простор ("indoor") услед разлике унутрашње и спољашње температуре и притисака, његове концентрације могу бити велике и значајно зависе од вентилације посматраног простора. Ради поређења, концентрације радона на отвореном на висини од 1m изнад тла, у просеку износе око  $10 \text{ Bq/m}^3$ , док су измерене просечне концентрације у затвореним просторијама, на пример у Европи, више од десет пута. Појединачна мерења у земљама Европе су показала и нивое од неколико стотина  $\text{Bq/m}^3$ , а у ређим случајевима и нивое од неколико хиљада  $\text{Bq/m}^3$ . Главни извор радона у породичним пребивалиштима је земљиште, које се налази директно испод објекта [NCRP, 1984]

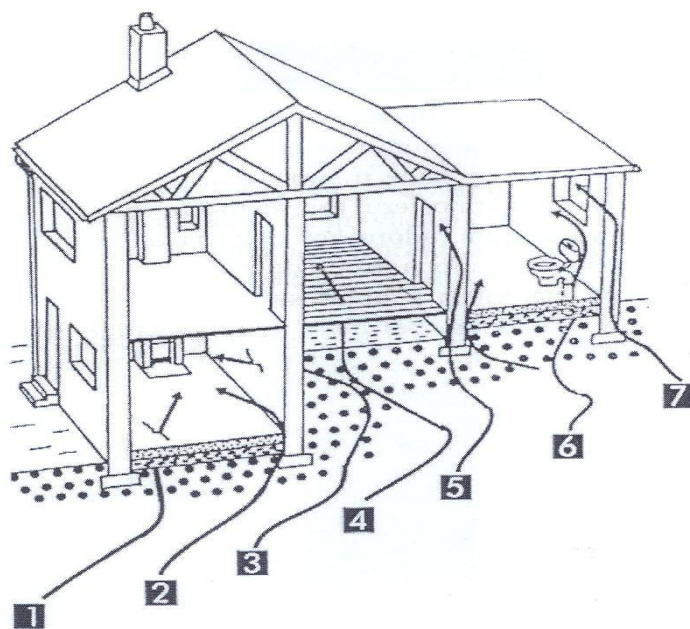
### ***1.2.2. Грађевински материјал као извор радона и начини уласка у просторије***

На концентрацију радона у зградама до другог спрата доминантан утицај има земљиште (хемијски састав, физичке и водено механичке особине, порозност тла) и у мањој мери грађевински материјали. Сви грађевински материјали у већој или мањој мери садрже природне радионуклиде у зависности од геолошког састава локације са које су узети за експлоатацију, као и од технолошких процеса њихове обраде. Материјали који садрже високу концентрацију урана и радона су неки гранити, алумоглиници, отпадни материјали из рудника и пепео. Могуће је у природи наћи различите типове локалних стена и земље (глине) са богатим садржајем урана који се користи као грађевински материјал, код којих концентрација радона може бити неколико хиљада  $\text{Bq/m}^3$  [Yonehira, 2004].

После завршетка градње неког објекта, тло испод основне плоче се, кроз извесно време мало слегне и услед тога се појави празан простор између бетонске плоче и површине земље испод ње. У том простору се нагомилава радон. Могући путеви уласка радона у затворени простор су приказани на слици 3. Да би се спречило продирање радона



у грађевину, пре свега мора се спречити пут којим би прошао. Уколико је кућа квалитетно направљена и нема ни најмањих пукотина на плочи и околним зидовима и ако плоча континуирано прелази у бочне зидове при чему је направљена квалитетна хидро изолација, радон не може да продре у затворен простор објекта. Будући да су количине заробљеног радона испод плоче (темеља) значајне, добро је да му се приликом изградње омогући наставак његовог природног пута према атмосфери и тиме му се смањи концентрација испод грађевине. То се изводи тако што се поставља цев, која води од простора под плочом до места где радон може да се изведе у отворену атмосферу. На слици 3. су означени места продирања радона у куће: **1.** пукотине у поду; **2.** грађевински спојеви; **3.** пукотине у зиду испод нивоа земљишта; **4.** међупростор између подова и земљишта; **5.** пукотине у зиду; **6.** простор око цеви; **7.** шупљине у зиду [De Meijeretal., 1992; Nero,1988; Nero 1989]



Слика 3. Места продирања радона у куће

Уколико је концентрација радона у просторијама где живе и раде људи изнад акционог нивоа потребно је предузети мере за снижавање концентрације радона. У зависности од датих околности те мере обухватају:

- смањивање притиска земног гаса у темељу грађевине (sub-floor depressurisation)
- постављање вентилације испод пода просторија (sub-floor ventilation)

- постављање подне изолације, парне бране затварањем отвора око цеви и сл. . (floor sealing and membranes)
- учесталија вентилација просторија
- измена земљишта испод грађевине (removal of subsoil)

Избор ових активности се врше после утврђивања гео потенцијала за ексхалацију пасивном методом предложеном у овом пројекту. После тога се у свакој просторији посебно и околини зграде врше мерења радона мерењем концентрације земног гаса који садржи радон, мерења пермеабилности тла и испитивања зграде активном методом мерења радона.

Ремедијација постављањем вентилације испод пода просторија се може вршити на више начина, а један од начина је ископавање мањег отвора у поду и рупе испод пода. У формиране отворе ставља се цев са рупицама при дну која се заптива у односу на рупу у поду и преко крова изводи напоље. При врху цеви се налази пумпа која врши избацивање ваздуха из отвора у коме се акумулирао радон. На тај начин се ствара разлика притисака ваздуха испод подне плоче куће и ваздуха изнад тј. у приземној просторији куће.

У неким земљама (нпр. Чешка) је као врло практична јединица уведен радонски индекс. То је величина која представља ниво ризика изласка (ексхалације) радона из тла. Радонски индекс зграде одређује ниво потребне заштите зграде од уласка радона, а зависи од карактеристика тла и типа темеља зграде (Nezmal et al., 2004). Одређивање радонског индекса се заснива на одређивању концентрација радона у гасу у земљи ("soil gas") и пермеабилности земље на мерном месту. Остали фактори као што су састав и геолошко стање (типови стена, присуство геолошких пукотина, рељеф терена и остали геолошки фактори) су такође корисни.

### **1.3. Транспорт радона**

Највећа концентрација радона је у минералним зрнима, има га у значајним количинама у земљином гасу, а мање концентрације су присутне изнад површине земље, изнад океана и у затвореним просторијама. Већина радонових атома никад не напусти минерал у коме настаје, већ остаје чврсто заробљен унутар кристалне решетке до свог радиоактивног распада. Зависно од врсте и влажности тла, садржаја у њему, његове

порозности и гранулације, концентрација радона на дубини 1 m може бити различита и креће се између 20-50 kBq/m<sup>3</sup>.

Напуштајући минерале, атоми радона у вадуху постају слободни атоми. Даљи транспорт је могућ на два начина: дифузијом и струјањем са вадухом и околним (подземним) гасовима (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), или водом која протиче кроз хоризонталне водене слојеве. Како је радон инертан елемент и не ступа у везу са другим елементима, може да пређе значајно растојање од места настанка. Подземни транспорт радона може да се представи једначином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eef}} \Delta C - \nabla(\vec{v}C) - \lambda C + \Phi \quad (1.1)$$

где је:  $C$  – концентрација радона (1/m<sup>3</sup>) у простору поре,  $D_{\text{eef}}$  – ефективни коефицијент дифузије радона (1/m<sup>3</sup>s),  $\vec{v}$  – брзина (m/s) супстанце која транспортује радон,  $\lambda$  – константа радиоактивног распада радона (1/s) и  $\Phi$  – јачина извора (1/m<sup>3</sup>s). Први члан десног дела једначине описује дифузију, други део конвекцију, трећи део распад и четврти део изворе радона.

Дифузија је главни начин транспорта са ограниченим дометом. Са једне стране, домет ограничава време живота изотопа, а са друге стране структура средине кроз коју се креће. У различитим срединама радон дифузијом прелази различита растојања, међу којима постоји велика разлика. Та разлика се може видети у Табели 3. у којој су дате граничне вредности коефицијената дифузије за радон у различитим срединама. Запажа се да је дифузија кроз крупан шљунак приближна дифузији кроз ваздух, док је веома мала кроз водом натопљену глину. Ако су земљине поре потпуно натопљене водом, земља ће имати исти дифузиони коефицијент као вода. Дифузиони коефицијент воде је 10 000 пута мањи од дифузионог коефицијента ваздуха [UNSCEAR, 2000].

Табела 3. Коефицијент дифузије,  $D$  за радон.

Средина	$D$ (m <sup>2</sup> /s)
Ваздух	10 <sup>-9</sup>
Суви песак	10 <sup>-9</sup> – 5 x 10 <sup>-10</sup>
Влажан песак	10 <sup>-9</sup>
Обрадива земља	2,5 x 10 <sup>-10</sup>
Глинена земља	8 x 10 <sup>-13</sup>
Вода	10 <sup>-13</sup>

Просечно се радон помери за  $1,6 \text{ m}$  у сувој земљи за време полуживота ( $D = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  за порозну земљу), а само  $1,6 \times 10^{-2} \text{ m}$  у влажној земљи ( $D = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Како је процес дифузије одговоран за пренос радона са дубине (од 1 до 2 m), до темеља објеката, познавања средњих дифузионих растојања су важна у одређивању лимита ефективног померања радона [UNSCEAR, 2000].

Дифузија радона кроз земљу је повезана са њеном порозношћу, односно зависи од гранулације, степена компактности структуре и садржаја воде у земљи. Већа порозност омогућава обимнији транспорт. Присутне порозне шупљине у земљи се надовезују и надграђују што није случај код стена. Порозност земљишта се дефинише преко односа величине поре-пукотине у земљишту. Постоје две веома битне компоненте: текстурални и структурни простор поре. Текстурални простор поре се односи на начин паковања честица земљишта, док је структурни простор поре зависан од количине ваздуха који се налази у узорцима земљишта. Концентрација радона се повећава са струјањем ваздуха навише, а при струјању наниже опада. Ове промене су значајне на дубинама од 0,5 m до 1 m где се уобичајено мери концентрација радона. На дубинама већим од 10 m ове промене су безначајне [Fleischer et al., 1980]

Градијент притиска може бити узрок форсираног струјања гаса или течности у међу простору у земљи, а могу га проузроковати различити геофизички и геохемијски феномени (земљотрес, вулканске ерупције и подземна експлоатација нафте, урана и других руда) [Thomas&Koyanagi, 1986].

У свим случајевима транспорта радона земним гасом, концентрација радона је у поређењу са кисеоником, азотом, угљендиоксидом и сл. крајње минорна компонента гаса. Процењено је да брзина транспорта радона не може да буде већа од  $(4-6) \times 10^{-5} \text{ m/s}$ . [Tanner, 1980].

Повећане концентрације радона се често налазе изнад зона фрактура стена, где су атоми урана или радијума, растворени у подземној води наталожили на површини пукотина. На тим местима су повећани нивои угљендиоксида и хелијума. Ови гасови могу да транспортују радон из пећина и пукотина стена [Thomas&Koyanagi, 1986]. Гас се транспортује до површине земље из унутрашњости, а са њиме и радон због промене притиска и температуре. Струјање ваздуха у површинском делу земље и на површини

може бити изазвано и флуктацијама атмосферског притиска или утицајем временских прилика као што су ветар, киша, и топљење снега. [ O'Conor et.al., 1993].

Промена атмосферског притиска може да утиче на јачину ексхалације, која је обично у негативној корелацији са градијентом атмосферског притиска [Clements&Wilkening, 1974; Owczarski et.al., 1990; Pinault&Baubron, 1997]. Код повећања притиска атмосферски ваздух са малим концентрацијама  $^{222}\text{Rn}$  бива потиснут у земљиште, чиме се испаравање смањује. Обрнуто, смањени притисак изазива истицање гаса богатог  $^{222}\text{Rn}$  из земљишта што даје високу ексхалацију и као последицу избацивања  $^{222}\text{Rn}$  из дубљих слојева земљишта ка површини [Sergovia, 1987, Clements&Wilkening, 1974].

Одлазећи са земљине површине у атмосферу, захваљујући великом разблажењу, концентрација радона се брзо смањује. Генерално, концентрација радона опада експоненцијално са висином. У ваздуху га има мало, а у затвореном простору се акумулира, те се може наћи у већим концентрацијама и зависи од вентилације простора [Gernich, 1996], јачине извора и услова коришћења просторија и др.

#### 1.4. Понашање радонових потомака у затвореним просторијама

Понашање радонових потомака у затвореним просторијама карактеришу следећи фактори:

- фактор узмака,
- јачина вентилације,
- коефицијент припајања односно концентрација и расподела аеросола у просторији,
- јачина депозиције и
- распад

Понашање радонових потомака у затвореним просторијама је описано Јакобијевим параметарским диференцијалним једначинама [Jacobi, 1972], које узимају у обзир радиоактивни распад и нестајање радонових потомака вентилацијом, депозицијом и транзицијом из једног елемента у други. Параметри Јакобијевог модела су: константа распада  $\lambda_i$ , коефицијент вентилације  $\lambda_v$ , коефицијенат припајања  $\lambda_a$  и константа депозиције неприпојеног и припојеног потомка  $\lambda_d^u$ ,  $\lambda_d^a$ , респективно у  $\text{h}^{-1}$ .

У скраћеном облику, Јакобијеве једначине су:

$$f_i^u = \frac{\lambda_i(f_{i-1}^u + p_{i-1}f_{i-1}^a)}{\lambda_i + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a} \quad (1.2)$$

$$f_i^a = \frac{\lambda_a f_i^u + \lambda_i(1 - p_{i-1})f_{i-1}^a}{\lambda_i + \lambda_v + \lambda_d^u} \quad (1.3)$$

где је:  $f_i$  однос активности концентрације  $i$ -tog радоновог потомка у односу на радон; горњи индекси  $^u, ^a$  су ознаке за невезани и везани радонов потомак, респективно, и  $p_{i-1}$  је фактор узмака дефинисан као усредњена вероватноћа ослобађања узмакнутог језгра након радиоактивног распада [Amgarou et.al., 2003].

Радонови потомци припојени аеросолима су описани једномодалном логаритамском расподелом  $f(d)$  датом једначином (1.4):

$$f(d) = \frac{e^{-\frac{(\ln d - \ln AMAD)^2}{2 \cdot \ln^2(\sigma_g)}}}{\sqrt{2\pi} \cdot d \cdot \ln(\sigma_g)} \quad (1.4)$$

где је: AMAD (Activity Median Aerodynamic Diametar) активносна медијана аеродинамичког дијаметра аеросола (медијана расподеле дели сет мерења на два дела, елементе сета података изнад и испод медијане),  $\sigma_g$  је геометријска стандардна девијација и  $d$  је еквивалентни пречник аеросола [Reist, 1993]. .

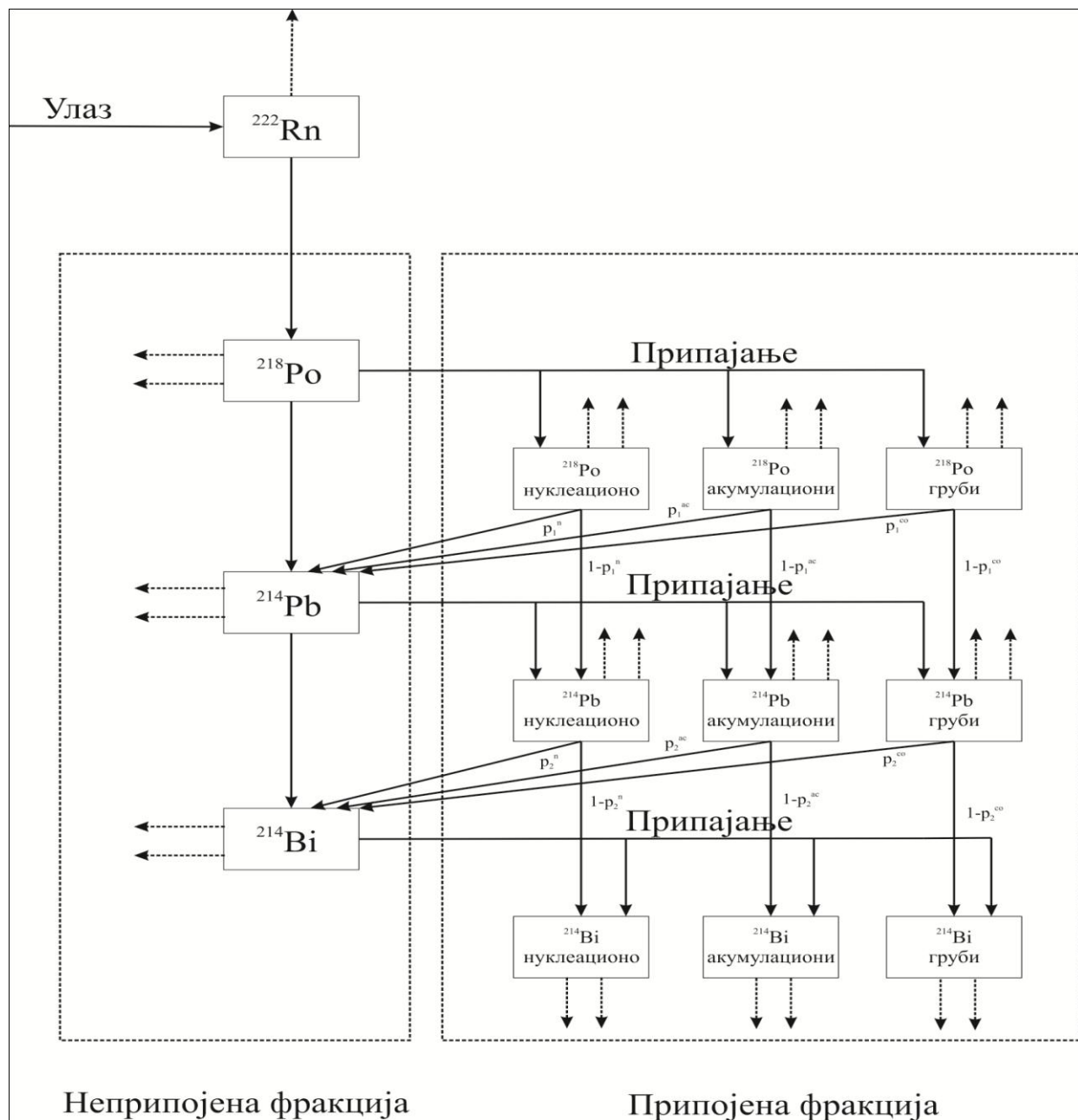
Побољшане технике мерења величине аеросола су показале да се радонови потомци налазе припојени аеросолима у три моде, названих: нуклеациона, акумулациона и груба [Porstendorfer&Reineking, 2000]. У свакој од мода, радиоактивни аеросоли су распоређени по лог-нормалној расподели са карактеристичним параметрима: аеродинамички дијаметар  $AMAD^{nuc}$ ,  $AMAD^{ac}$  и  $AMAD^{co}$  и геометријским стандардним девијацијама  $\sigma_{g,nuc}$ ,  $\sigma_{g,ac}$  и  $\sigma_{g,co}$ . Укупна расподела припојених аеросола је добијена сумирањем једначина 1.2,1.3,1.4 добије се:

$$f(d) = \sum_{i=1}^3 f_i \frac{e^{-\frac{(\ln d - \ln AMAD^i)^2}{2 \cdot \ln^2(\sigma_g)}}}{\sqrt{2\pi} \cdot d \cdot \ln(\sigma_{g,i})} \quad (1.5)$$

где је:  $f_i$  удео те моде у укупној расподели припојених аеросола. Тро-модалну дистрибуцију су користили [Marsh&Birchall, 2000] у анализама осетљивости конверзионог фактора између ефективне дозе и излагања потомцима од разних релевантних параметара.

Такође, [Marshetal., 2002] су ову расподелу користили у анализи неодређености варијабилности конверзионог факора. Бројне вредности за  $AMAD_i$ ,  $\sigma_{gi}$ , и  $f_i$  коришћеним од Marsh-a и Birchall-a (2000) су  $AMAD^{nucl}=0.05 \mu m$ ,  $\sigma_{g,nucl}= 2.0$ ,  $f_{nucl}=0.28$ ;  $AMAD^{ac}=0.25 \mu m$ ,  $\sigma_{g,ac}= 2.0$ ,  $f_{ac}=0.70$ ;  $AMAD^{co}=1.50 \mu m$ ,  $\sigma_{g,co}= 1.5$ ,  $f_{co}=0.02$ .

Блок-дијаграм који описује понашање радонових потомака у затвореним просторијама са три моде у припојеном облику је дат на слици 4 [Nikezić& Stevanović, 2004].



Слика 4. Општа шема понашања радонових потомака у затвореним просторијама

Прве две једначине које описују концентрације радона и неприпојеног  $^{218}\text{Po}$  су:

$$\frac{dN_0}{dt} = S - \lambda_0 N_0 - \lambda_v N_0 \quad (1.6)$$

где је:  $N_0$  концентрација  $^{222}\text{Rn}$  (атом/ $\text{m}^3$ ) и  $S$  је снага извора радона (атом/ $\text{m}^3\text{s}$ ),  $\lambda_0$  константа распада  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\lambda_v$  коефицијент вентилације. Распад  $^{222}\text{Rn}$  у неприпојеном атом  $^{218}\text{Po}$  се дешава у ваздуху и његова концентрација у ваздуху је описана следећим изразом:

$$\frac{dN_1^u}{dt} = \lambda_0 N_0 - N_1^u (\lambda_1 + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a) \quad (1.7)$$

где је:  $N_1^u$  бројчана концентрација неприпојеног атома  $^{218}\text{Po}$  (атом/ $\text{m}^3$ ). Први израз у једначини (1.7)  $\lambda_0 N_0$  представља број створених атома  $^{218}\text{Po}$  распадом  $^{222}\text{Rn}$ . Неприпојени атоми се могу припојити аеросолима, који су присутни у ваздуху, са коефицијентом припајања  $\lambda_a$ , или могу бити уклоњени депозицијом  $\lambda_d^u$ , вентилацијом,  $\lambda_v$  или распадом  $\lambda_1$ .

Следеће три једначине описују концентрацију припојеног  $^{218}\text{Po}$  у тро-модалном облику:

$$\frac{dN_1^{nucl}}{dt} = \lambda_a^{nucl} N_1^u - N_1^{nucl} (\lambda_1 + \lambda_v + \lambda_d^{nucl}) \quad (1.8)$$

$$\frac{dN_1^{ac}}{dt} = \lambda_a^{ac} N_1^u - N_1^{ac} (\lambda_1 + \lambda_v + \lambda_d^{ac}) \quad (1.9)$$

$$\frac{dN_1^{co}}{dt} = \lambda_a^{co} N_1^u - N_1^{co} (\lambda_1 + \lambda_v + \lambda_d^{co}) \quad (1.10)$$

где су:  $N_1^{nucl}$ ,  $N_1^{ac}$  и  $N_1^{co}$  су бројчане концентрације атома  $^{218}\text{Po}$  у нуклеационој, акумулационој и грубој моди. Први терм на десној страни једначина (1.8-1.10) представља број атома  $^{218}\text{Po}$  који се припоје аеросолима у појединачним модовима. Други терм на десној страни једначина (1.8-1.10) је губитак атома  $^{218}\text{Po}$  услед распада, вентилације и депозиције. Различити коефицијенти депозиције,  $\lambda_d^{nucl}$ ,  $\lambda_d^{ac}$  и  $\lambda_d^{co}$  су претпостављени у ова три мода. На овај начин може бити настављен развој једначина за следеће потомке у низу  $^{222}\text{Rn}$ :

$$\frac{dN_2^u}{dt} = \lambda_1 N_1^u + \lambda_1 (p_1^{nucl} N_1^{nucl} + p_1^{ac} N_1^{ac} + p_1^{co} N_1^{co}) - N_2^u (\lambda_2 + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a) \quad (1.11)$$

$$\frac{dN_2^{nucl}}{dt} = \lambda_a^{nucl} N_2^u + (1 - p_1^{nucl}) \lambda_1 N_1^{nucl} - N_2^{nucl} (\lambda_2 + \lambda_v + \lambda_d^{nucl}) \quad (1.12)$$



$$\frac{dN_2^{ac}}{dt} = \lambda_a^{ac} N_2^u + (1 - p_1^{ac}) \lambda_1 N_1^{ac} - N_2^{ac} (\lambda_2 + \lambda_v + \lambda_d^{ac}) \quad (1.13)$$

$$\frac{dN_2^{co}}{dt} = \lambda_a^{co} N_2^u + (1 - p_1^{co}) \lambda_1 N_1^{co} - N_2^{co} (\lambda_2 + \lambda_v + \lambda_d^{co}) \quad (1.14)$$

$$\frac{dN_3^u}{dt} = \lambda_2 N_2^u + \lambda_2 (p_3^{nucl} N_2^{nucl} + p_3^{ac} N_2^{ac} + p_3^{co} N_2^{co}) - N_3^u (\lambda_3 + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a) \quad (1.15)$$

$$\frac{dN_3^{nucl}}{dt} = \lambda_a^{nucl} N_3^u + (1 - p_2^{nucl}) \lambda_2 N_2^{nucl} - N_3^{nucl} (\lambda_3 + \lambda_v + \lambda_d^{nucl}) \quad (1.16)$$

$$\frac{dN_3^{ac}}{dt} = \lambda_a^{ac} N_3^u + (1 - p_2^{ac}) \lambda_2 N_2^{ac} - N_3^{ac} (\lambda_3 + \lambda_v + \lambda_d^{ac}) \quad (1.17)$$

$$\frac{dN_3^{co}}{dt} = \lambda_a^{co} N_3^u + (1 - p_2^{co}) \lambda_2 N_2^{co} - N_3^{co} (\lambda_3 + \lambda_v + \lambda_d^{co}) \quad (1.18)$$

У горњим једначинама,  $p_1^{nuc, ac, co}$  су фактори узмака након алфа распада  $^{218}\text{Po}$  у одговарајућим модовима, и  $p_2^{nuc, ac, co}$  су фактори узмака након бета распада  $^{214}\text{Pb}$ , за чију вредност је узета нула.

У скраћеном облику, ове једначине се могу писати:

$$\frac{dN_k^u}{dt} = \lambda_{k-1} N_{k-1}^u + \lambda_{k-1} (p_k^{nucl} N_{k-1}^{nucl} + p_k^{ac} N_{k-1}^{ac} + p_k^{co} N_{k-1}^{co}) - N_k^u (\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a) \quad (1.19)$$

$$\frac{dN_k^{nucl}}{dt} = \lambda_a^{nucl} N_k^u + (1 - p_{k-1}^{nucl}) \lambda_{k-1} N_{k-1}^{nucl} - N_k^{nucl} (\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^{nucl}) \quad (1.20)$$

$$\frac{dN_k^{ac}}{dt} = \lambda_a^{ac} N_k^u + (1 - p_{k-1}^{ac}) \lambda_{k-1} N_{k-1}^{ac} - N_k^{ac} (\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^{ac}) \quad (1.21)$$

$$\frac{dN_k^{co}}{dt} = \lambda_a^{co} N_k^u + (1 - p_{k-1}^{co}) \lambda_{k-1} N_{k-1}^{co} - N_k^{co} (\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^{co}) \quad (1.22)$$

У стационарном стању, тј., стању достигнуте равнотеже, први изводи су једнаки нули, тако да једначине постају линеарне, писане у скраћеном облику:

$$N_k^u = \frac{\lambda_{k-1} N_{k-1}^u + \lambda_{k-1} (p_k^{nucl} N_{k-1}^{nucl} + p_k^{ac} N_{k-1}^{ac} + p_k^{co} N_{k-1}^{co})}{\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^u + \lambda_a} \quad (1.23)$$

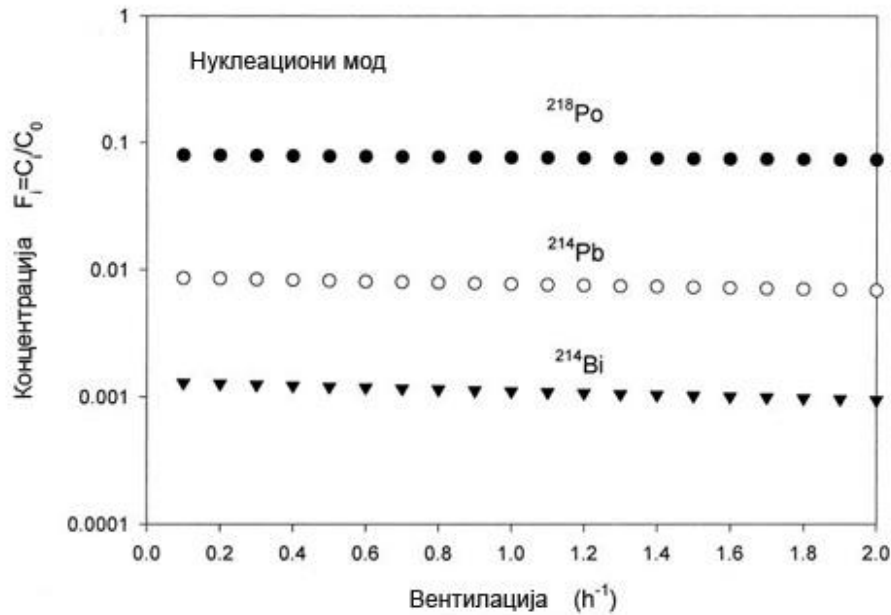
$$N_k^{nucl} = \frac{\lambda_a^{nucl} N_k^u + (1 - p_{k-1}^{nucl}) \lambda_{k-1} N_{k-1}^{nucl}}{\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^{nucl}} \quad (1.24)$$

$$N_k^{ac} = \frac{\lambda_a^{ac} N_k^u + (1 - p_{k-1}^{ac}) \lambda_{k-1} N_{k-1}^{ac}}{\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^{ac}} \quad (1.25)$$

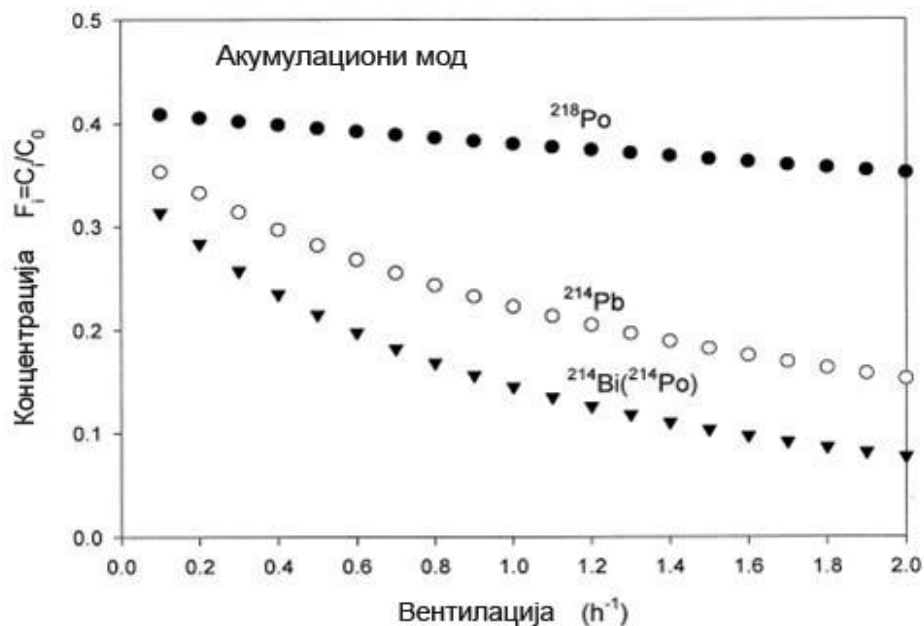
$$N_k^{co} = \frac{\lambda_a^{co} N_k^u + (1 - p_{k-1}^{co}) \lambda_{k-1} N_{k-1}^{co}}{\lambda_k + \lambda_v + \lambda_d^{co}} \quad (1.26)$$

где је  $k=1,2,3$ .

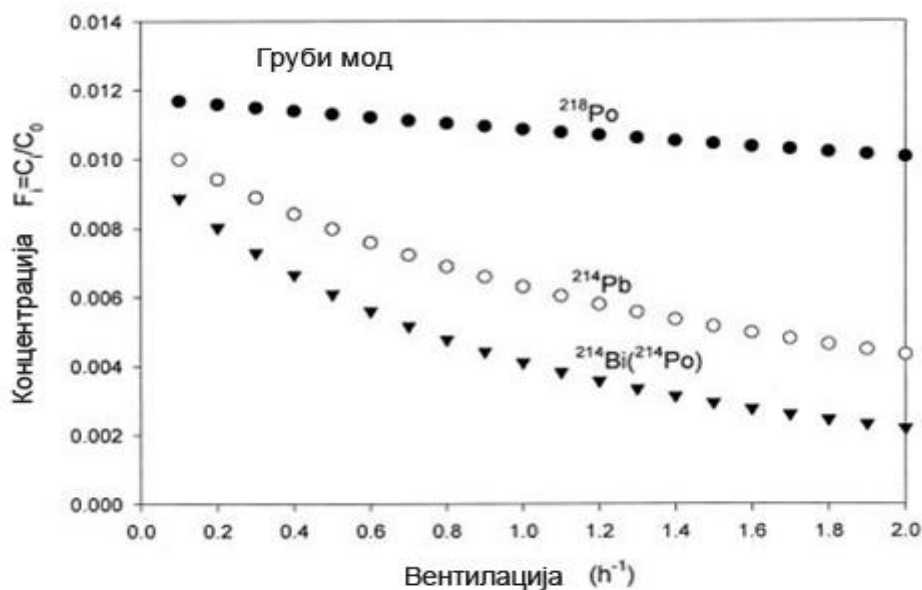
На сликама 5, 6 и 7 дат је однос концентрације радонових потомака у нуклеационој, акумулационој и грубој моди и радон у функцији јачине вентилације. Остали параметри су посматрани као константе, осим фактора узмака.



Слика 5. Однос концентрације потомака радона и радона у нуклеационој моди у функцији јачине вентилације



Слика 6. Однос концентрације потомака радона у акумулационој моди и концентрације радона у функцији јачине вентилације



Слика 7. Однос концентрације потомака радона у грубој моди и концентрације радона у функцији јачине вентилације.

За рачунање фактора узмака за сферне  $SiO_2$  аеросоле, Mercer, (1976) је користио аналитички приступ и добио је вредност за  $p=0,81$ . Фактори узмака  $^{214}Pb$  су недавно прорачунати од Никезића и сарадника [Nikezić et.al., 2004]. Израчунат је за сферне и

елиптичне аеросоле грађене на  $\text{SiO}_2$  и комбинацијама  $\text{SiO}_2$  и воде око њега. Два типа нечистоћа, површинска и запреминска, су такође узете у разматрање. Показано је да фактор узмака зависи од облика аеросола и места на коме се у аеросолу налази припојени атом у њему.

Фактор узмака је одређен за сваки мод на следећи начин. Претпостављено је да су аеросоли у нуклеационој моди грађени од нитрата и сулфата; у акумулационој су грађени од угљеника; и у грубој моди су грађени од  $\text{SiO}_2$ . За сва три мода је претпостављен сферни облик аеросола и претпостављена је површинска контаминација, тј радиоактивни потомак радона се налази на површини аеросола. Растојања која узмакнута језгара прелазе у  $\text{SiO}_2$ , C,  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  су израчунате користећи програму SRIM 2003 [Ziegler, 2003]. Монте Карло метод је коришћен да одреди случајни правац кретања узмакнутог језгра. Фактор узмака, тј. вероватноћа да узмакнути атом напусти језгро након распада је рачунат у функцији пречника аеросола. Тада, усредњена вредност фактора узмака, је одређена помоћу логаритамске дистрибуције за сваки мод. Фактор узмака одређен на овај начин је највећи у нуклеационој моди и износи  $\bar{p} = 1$  за  $\text{NO}_2$  дужина путање узмакнутог језгра је већа од пречника аеросола у овој моди и одвајање се дешава у свим случајевима независно од смера узмака. Ако је аеросол грађен од  $\text{SO}_2$ , тада је фактор узмака  $\bar{p} = 0,95$ . У акумулационој моди (аеросол је грађен од угљеника)  $\bar{p} = 0,51$  и у грубој је  $\bar{p} = 0,52$ .

На слици 5. може се приметити да концентрација потомака слабо зависи од коефицијента вентилације у нуклеационој моди. Зависност је више наглашена у акумулационој и грубој моди (слике 6 и 7) где се однос смањује са повећањем јачине вентилације. Већина атома потомака се налази у акумулационој моди.

Јакобијев модел затворене просторије је проширен тако да су узете у обзир три моде расподеле припојених радонових потомака. У моделима заснованим на једномодалној расподели, једна вредност за фактор узмака  $p_I = 0.8$  [Mercer, 1976]. Фактори узмака  $p_I^{nucl}$ ,  $p_I^{a\ c}$  и  $p_I^{co}$  су одређени Монте Карло симулацијама и добијене су вредности различите од 0,8. Ови резултати су коришћени у анализи тромодалне расподеле. Додатно, је израчунат фактор узмака за једномодалну расподелу и добијена је вредност  $p_I = 0.68$ . [Nikezić & Stevanović, 2004].

### 1.5. Основне величине у радијационој физици

Неке од физичких величина које се користе у области физике јонизујућих зрачења су:

1. Активност радиоактивног извора ( $A$ ), дефинисана је као количник броја нуклеарних трансформација или прелаза, насталих у извесној количини радионуклида или у неком радиоактивном извору. Међународна (SI) јединица за активност је Бекерел [Bq]. Активност од 1 Bq има радиоактивни извор у којем се дешава један распад радиоактивног језгра у 1 секунди:  $[1 \text{ Bq} = \text{s}^{-1}]$ .

2. Период полураспада ( $T_{1/2}$ ) представља време за које активност радиоактивног извора опадне на половину, при чему важи релација:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.27)$$

где су:  $\lambda$  - константа распада  $[\text{s}^{-1}]$ ,  $\tau$  - време полуживота  $[\text{s}]$ ; Јединица за  $T_{1/2}$  је секунда  $[\text{s}]$ .

3. Константа распада ( $\lambda$ ) представља вероватноћу да се неко радиоактивно језгро распадне у јединици времена, при чему важи релација:

$$A = N \cdot \lambda \quad (1.28)$$

где су:  $A$  - активност радиоактивног извора [Bq],  $N$  – број радионуклида посматраног извора. Јединица за  $\lambda$  је реципрочна секунда  $[\text{s}^{-1}]$ .

4. Апсорбована доза ( $D$ ), за свако јонизујуће зрачење, дефинисана је као количник енергије предате елементу озрачене материје и масе тог елемента:

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dV} \quad (1.29)$$

где су:  $dE$  - средња вредност енергије коју јонизујуће зрачење предаје материји у елементу запремине  $dV$ ,  $dm$  – маса материје у том елементу запремине,  $\rho$  - густина материје означене средине. SI јединица за апсорбовану дозу J/kg и има посебан назив: Греј и ознаку [(Gy). Греј је апсорбована доза у телу масе 1kg, које је, апсорбовало 1 J енергије јонизујућег зрачења. Тако је:  $[1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}]$ .

5. Еквивалентна доза јонизујућег зрачења ( $H$ ) је величина која се користи само у заштити од јонизујућег зрачења, а дефинисана је релацијом:

$$H = \sum_R w_R D_R \quad (1.30)$$

где су:  $D_R$  - апсорбована доза јонизујућег зрачења врсте  $R$ ,  $w_R$  - су радијациони тежински фактори зрачења врсте  $R$ , бездимензиона величина која за  $\alpha$  зрачење износи  $w_R=20$  [ICRP,1981]. Јединица за еквивалентну дозу у SI је Сиверт [ $1\text{Sv}=\text{J/kg}$ ].

6. Ефективна доза ( $H_e$ ) је уведена да би се проценио ризик стохастичких ефеката. Дефинисана је изразом:

$$H_e = \sum_T w_T D_T \quad (1.31)$$

где су:  $H_T$  - ефективна доза за  $T$ -ти орган или ткиво,  $w_T$  - радијациони ткивни тежински фактор за поједине органе, који представљају део стохастичког ризика, за појаву канцера на органу  $T$ .

### 1.5.1. Величине које карактеришу контаминацију ваздуха радоном

За описивање контаминације ваздуха радоном користе се посебне физичке величине, које су од значаја за овај рад:

1. Концентрација радона ( $C$ ) представља активност радона у јединици запремине:

$$C = \frac{A}{V}, [\text{Bq/m}^3]. \quad (1.32)$$

2. Концентрација потенцијалне алфа енергије (Potential Alpha Energy Concentration, PAEC). PAEC је сума потенцијалних алфа енергија свих атома у  $1\text{ m}^3$  ваздуха било које смеше краткоживећих радонових или торонових потомака [Swedjemark, 1983] и може се изразити једначином:

$$PAEC = \sum_{j=1}^N N_j E_j \quad (1.33)$$

где су:  $N_j$  - бројчана концентрација  $j$ -тог радоновог краткоживећег потомка, по  $\text{m}^3$  (јединица за  $N_j$  је  $(\text{m}^{-3})$ ),  $E_j$  - потенцијална  $\alpha$  енергија коју емитује  $j$  - ти потомак

(изражен у [J] или у [MeV]. Системска јединица за PAEC је [J/m<sup>3</sup>]. Вансистемска јединица, која се у пракси често користи је, Working Level (WL) и њена вредност је:

$$1WL = 21\mu J / m^3 = 1,3 \cdot 10^{14} eV / m^3$$

У случају да је <sup>222</sup>R<sub>n</sub> у равнотежи са својим краткоживећим потомцима, концентрација радона при којој је PAEC = 1 WL, износи 3,7 kBq/m<sup>3</sup>. Ова вредност концентрације је доста висока: средња вредност концентрације радона у затвореном простору је 37 Bq/m<sup>3</sup> [UNSCEAR, 1977] док је на отвореном нижа 5 – 10 пута.

3. Излагање радоновим потомцима (експозиција) представља производ PAEC –а и временаведеног у атмосфери са тим PAEC-ом. Системска јединица ове величине је [Js/m<sup>3</sup>]. У пракси се често користи Working Level Month (WLM). Нека особа је изложена радоновим потомцима од 1 WLM ако у атмосфери у којој је PAEC = 1 WL проведе 173 сата. Веза између WLM и системске јединице је:

$$1WLM = 13,08Js / m^3$$

4. Равнотежина еквивалентна концентрација радона (Equilibrium Equivalent Concentration, EEC) има скраћену ознаку C<sub>e</sub>. Односи се на равнотежну смешу краткоживећих радонових потомака у ваздуху. Представља концентрацију радона која је у радиоактивној равнотежи са потомцима, а која има исти PAEC као и неравнотежна смеша на коју се EEC односи. Средња вредност EEC у затвореним просторијама износи 15 [Bq/m<sup>3</sup>].

5. Фактор равнотеже радона и краткоживећих потомака (F) се дефинише изразом [Swedjemark, 1983]:

$$F = \frac{C_e}{C_o} \quad (1.34)$$

где су: C<sub>e</sub> - равнотежна еквивалентна концентрација радона [Bq/m<sup>3</sup>], C<sub>o</sub> – стварна концентрација радона у ваздуху [Bq/m<sup>3</sup>]. Услов који мора да задовољи F је да је F ≤ 1. Средња вредност F у затвореним просторијама је око 0,4 [Porstendorfer, 1987].

## 1.6. Процена ефективне дозе од радона

Сагласно UNSCEAR-у из 1993 године, просечна концентрација радона је  $37 \text{ Bq/m}^3$  у затвореном простору, "indoor radon" и  $10 \text{ Bq/m}^3$  у отвореном простору "outdoor radon". Коришћењем одговарајућих фактора од 0,4 за "indoor" и 0,8 за "outdoor" радон, добија се просечна ефективна концентрација (EEF)  $16 \text{ Bq/m}^3$  у просторијама и  $8 \text{ Bq/m}^3$  у спољашњој средини. На основу фактора конверзије, сагласно UNSCEAR-у, ефективна еквивалентна доза ( $E$ ) је  $9 \times 10^{-6} \text{ mSv/h}$  од  $1 \text{ Bq/m}^3$  ефективне еквивалентне концентрације (EEC) радона у спољашњем и унутрашњем простору, и  $1,5 \times 10^{-3} \text{ mSv/god}$  за удахнути радон од  $1 \text{ Bq/m}^3$  раствореног у ткиву. Доза од  $1,2 \times 10^{-3} \text{ mSv/god}$  постулира се на следећи начин [Milić, 2003]:

- за продукте распада у спољашњој средини:

$$E_{out} = 8 \text{ Bq/m}^3 \times 9 \times 10^{-6} \text{ mSv h}^{-1} / \text{Bq m}^{-3} \times 0,2 \times 8760 \text{ h god}^{-1} \quad (1.35)$$

$$E_{out} = 0,13 \text{ mSv/god} \quad (1.36)$$

- за продукте распада у затвореном простору:

$$E_{in} = 16 \text{ Bq/m}^3 \times 9 \times 10^{-6} \text{ mSv h}^{-1} / \text{Bq m}^{-3} \times 0,8 \times 8760 \text{ h god}^{-1} \quad (1.37)$$

$$E_{in} = 1,0 \text{ mSv h/god} \quad (1.38)$$

- за радон удахнут у унутрашњој и спољашњој средини:

$$E_{in\&out} = [(40 \text{ Bq/m}^3 \times 0,8) + (10 \text{ Bq/m}^3 \times 0,2)] \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ mSv h}^{-1} / \text{Bq m}^{-3} \quad (1.39)$$

$$E_{in\&out} = 0,051 \text{ mSv/god} \quad (1.40)$$

Па је ефективна еквивалентна доза  $E$ :

$$E = E_{out} + E_{in} + E_{in\&out} = (0,13 + 1,0 + 0,051) \text{ mSv/god} \quad (1.41)$$

$$E = 1,18 \text{ mSv/god} \quad (1.42)$$

У радном и стамбеном простору човек проведе просечно око 80% свог времена, а 20% на отвореном простору, па зато у рачуну фигуришу параметри  $0,8 \times 8760 \text{ h/god}$  и  $0,2 \times 8760 \text{ h/god}$ .



### 1.7. Алфа зрачење и атмосферски јони као последица распада радиоактивних гасова

Алфа ( $\alpha$ ) честица се емитује приликом радиоактивног распада, који се по правилу јавља код најтежих радионуклида, почев од редног броја 83, бизмута - Bi.  $\alpha$  честице, су језгра хелијума високих енергија. То су позитивно наелектрисани јони, састављени од два протона и два неутрона.  $\alpha$  зрачење снажно интерагује са материјом и врши интензивну јонизацију материје кроз коју пролази, те има високу специфичну јонизацију.

Постоји више апроксимативних формула које повезују домет ваздуху,  $x$  (cm) и полазну енергију  $\alpha$  честица  $E$  (MeV); једна од њих је  $x = 0,318 \cdot E_{\alpha}^{3/2}$ . Линеарни губитак енергије нелектрисане честице услед процеса јонизације и екситације се зове ЛЕТ (Linear Energy Transfer) и једнак је  $LET = dE/dx$ . Домет  $\alpha$  честице у ваздуху износи неколико центиметара. Када се заустави,  $\alpha$  честица захвата два електрона и постаје атом инертног гаса - хелијума. Због тако високе специфичне јонизације, алфа зрачење не пролази кроз површински слој коже. Реална опасност се јавља уколико се удисањем ваздуха у организам унесу алфа емитери, као у случају радона и његових краткоживећих потомака, или уколико се контаминација догоди преко површинских рана на кожи, или ингестијом преко воде и хране. У случајевима интерне контаминације алфа емитера, наступа интензивна јонизација ткива при којој се у ткиву депонују велике количине енергије. Због ове чињенице заштита од контаминације је у ствари доминантна заштита од алфа зрачења [Baggenstos, 1999].

Радиоактивни гасови Rn и Tn се распадају емитовањем  $\alpha$  честица енергија 5.49 MeV и 6.29 MeV. Сличним распадом и енергијама се распадају и њихови потомци док не достигну своје стабилно стање.  $\alpha$  честице, услед своје релативно велике масе, интензивно врше јонизацију средине кроз коју пролазе и на тај начин стварају велики број јонских парова (слободан електрон и позитивно неелектрисани атом) у атмосфери и сматрају се главним изворима јона у приземном слоју атмосфере. Енергија потребна за јонизацију молекула ваздуха је око 34 eV тако да свака  $\alpha$  честица ствара више од 100 000 јонских парова.

Јони се у слободној атмосфери, осим распадима радиоактивних гасова, стварају и деловањем космичког зрачења (20% укупне јонизације) и природне  $\gamma$  радиоактивности. Локални извори могу бити природни (таласи, киша, водопади, грмљавина,..) и вештачки (коронално пражњење, баријерно пражњење, ватра, и сл.).

Еволуција и структура атмосферских (малих) јона почиње примарном јонизацијом, а завршава се релативно стабилном формом у којој су молекулски јони окружени слојем молекула воде, тј. хидратизовани, због тога се често зову и кластер јони. Јони су претежно једноструко наелектрисани, вишеструко наелектрисање се дешава само код великих јона  $>50 \text{ nm}$  (Horrak, 2001). Средња покретљивост позитивних јона износи  $1,36$  и негативних  $1,53 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , а средње време живота им је од 5 до 60 секунди (Horrak et al., 2000).

Табела 4. Подела јона у атмосфери по величинама (Horrak, 2001, Horrak et al., 2000)

Класа атмосферских јона	Линеарна димензија, nm	Покретљивост, $\text{cm}^2/\text{Vs}$	Традиционални назив
Мали кластер јони	0,36 – 0,85	1,3 – 3,2	мали (лаки) јони
Велики кластер јони	0,85 – 1,6	0,5 – 1,3	мали (лаки) јони
Аеросолски средњи јони	1,6 – 7,4	0,034 – 0,5	средњи јони
Аеросолски лаки велики јони	7,4 - 22	0,0042 – 0,034	велики јони
Аеросолски тешки велики јони	22 – 79	0,00041 – 0,0042	велики (Langevin-ови) јони

У тропосфери, стање равнотеже се постиже када се генерисани јони неутралишу процесима рекомбинације, јон-аеросол спајања (attachment) или електростатичком депозицијом. Стварна вероватноћа за ове процесе једнака је и за позитивне и за негативне јоне, али узимајући у обзир већу мобилност негативних јона, добија се да је концентрација позитивних јона у ваздуху 10–20% већа него концентрација негативних. Време живота малих атмосферских јона, насталих природним путем, је одређено локалним концентрацијама аеросола (Tamm, 1970). Оно варира од 10 до 300 s. У ваздуху загађеном аеросолима, јони се неутралишу припајањем (attachment) док се у чистом ваздуху процес неутрализације примарно врши само-рекомбинацијом (Harrison i Carslaw, 2003).

Једначина јонске равнотеже гласи:

$$\frac{dn_{\pm}}{dt} = q - \alpha n_{+} n_{-} - n_{\pm} \beta Z \quad (1.43)$$

где је  $\alpha$  - јон-јон рекомбинациони коефицијент,  $\beta$  - јон-аеросол коефицијент припајања,  $Z$  - концентрација аеросола. Величина атмосферских јона зависе од начина њиховог стварања и дужине живота. Јони настали путем радиоактивних распада и космичког зрачења су величине до 1 nm, док су јони настали распршивањем воде (тзв. Ленардови јони) величине око 2 nm (Laakso et al., 2006, Kolarž et al., 2012). Концентрација кластер јона у атмосфери се мења на сличан начин као и концентрација Rn. Њихов број по јединичној запремини опада са вертикалним растојањем од тла, а дневни максимуми им се јављају симултано са максимумалним дневним концентрацијама радона, тј. у зору.

## 2. ОПШТЕ МЕТОДЕ И ТЕХНИКЕ МЕРЕЊА РАДОНА

Методе мерења радона у циљу одређивања његове концентрације обухватају идентификацију и бројање нуклеарних догађаја (Report EUR 1993). Заснивају се на детекцији и регистрацији ефеката интеракције наелектрисаних честица ( $\alpha$  и  $\beta$ ) или зрачења ( $\gamma$ ) са материјалом детектора. Све методе се деле на активне и пасивне, у зависности да ли се обрада резултата врши у току самог процеса мерења (активне) или након дуготрајног излагања у атмосфери радона (пасивне). У оба случаја праг регистрације са физичке тачке гледишта представља губитак енергије јонизујуће честице потребан за кидање одређеног броја хемијских веза у полимеру материјала детектора. Методе мерења се заснивају на одређивању густине трагова  $\alpha$  честица из распада радона (броја трагова по јединици површине детектора).

### 2.1. Пасивна мерна техника

Један од начина мерења концентрације радона је применом пасивне мерне технике уз употребу нуклеарних траг детектора. Историја нуклеарних траг детектора почиње 1958. године када је Yuong [Yuong, 1958] открио ако се LiF кристал држи у контакту са уранском фолијом и озрачује термалним неутронима створиће се трагови након третмана са

агресивним хемијским раствором. Број трагова показао је потпуну везу са процењеним бројем фисионих продуката из уранске фолије који су узмакли у кристалу.

Годину дана касније Slik&Barnes (1959) су извели своје запажање ових оштећених области у лискуну користећи трансмисиони електронски микроскоп гдје су трагови изгледали као људске власи.

Опсежна истраживања овог ефекта почели су Fleischer, Pricei Walker током раних 1960-их. Они су проширили технику нагризања коју је развио Yuong у лискуну и многим другим материјалима као што су стакла, пластике и различити минерални кристали [Fleischer et.al., 1975].

Ране студије су показале да су нагрижени трагови:

1. произведени само тешким јонизујућим честицама (тј, алфа честицама у случају пластике и фисионих продуката у случају кристала)
2. произведени само у електричним изолаторима и чистим полупроводницима
3. стабилни и када се изложе великим дозама X-зрачења,  $\beta$ -честица, ултраљубичастог зрачења итд.

Касније је показано да високе дозе ових зрачења мењају карактеристике нуклеарних траг детектора. Овим истраживањима је започео развој ове научне области и публикован је велики број научних радова и неколико књига [Fleischer et.al., 1975; Duranni&Bull, 1987; Duranni&Ilić, 1997; Fleischer, 1998].

Примена ове технике се у пракси заснива на детекцији  $\alpha$  честица из распада радона и потомака у диелектричном детектору. Пролазећи кроз чврсту диелектричку средину тешке наелектрисане честице производе дефекте (трагове) у кристалној структури. Ти дефекти су разлучиви од нечистоћа и неправилности у диелектричном материјалу и они се након одређеног хемијског третмана могу видети оптичким микроскопом [Yuong, 1958].

Мерење концентрације радона овом техником изводи се тако да детектор на месту мерења остане довољно дуго, чиме се постиже најзначајнија предност пасивних радонских детектора у односу на континуалне, а то је интегрално бележење концентрације. Када се укупна измерена запреминска активност подели са временом излагања детектора добије се средња вредност запреминске активности у дужем временском интервалу обухватајући могуће стохастичке промене концентрације радона што је најважније у процени годишње дозе коју човек прими.

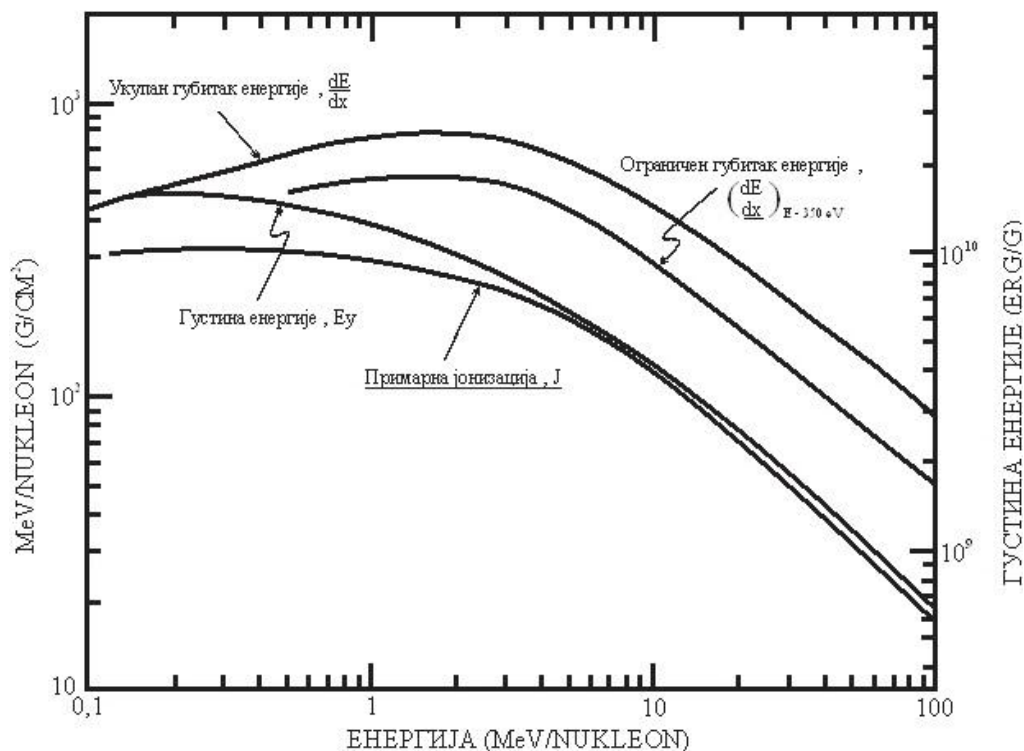
### 2.1.1. Примери детекције код чврстих траг детектора

Убрзо након открића првих чврстих траг детектора било је јасно да су једино средине са ниском електропроводношћу (мала концентрације слободних електрона) погодне за формирање трагова. У металима би формиран траг упадног јона брзо „избрисали“ слободни електрони рекомбинацијом са јон-шупљинама средине пре хемијског третмана.

Губитак енергије упадног јона је последица интеракције са електронима и језгрима детекторске средине. За јоне енергија већих од 1 MeV нуклеарни губици су мањи од електронских. Ови први су једино значајни при крају трага са малим енергијама. С друге стране значајнија је интеракција јона са електронима атома (молекула) детектора. Она се описује Бете-Блоховом формулом:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{C_1 Z^2}{\beta^2 (4\pi\epsilon_0)^2} \left[ \ln\left(\frac{W_{\max}}{I}\right)^2 - 2\beta^2 - \delta - U \right] \quad (2.1)$$

где су:  $C_1 = 2\pi n_e e^4 / mc^2$ ,  $n_e$  - концентрација електрона,  $m$  - маса електрона,  $W_{\max}$  - максимални трансфер енергије,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $v$  - брзина јона,  $I$  - средњи потенцијал јонизације,  $\delta$  - корекција на ефекте поларизације средине за релативистичке брзине, и  $U$  - корекција за мале брзине [Durrani&Bull, 1987]. Губитак енергије упадног јона је постепен, велики број електрона односи мале порције енергије у односу на почетну енергију јона. Одређен број електрона добија довољно енергије да напусти атом и тако за собом оставља јоне, док се изврстан број електрона само побуди до виших енергетских нивоа. Функција укупног губитка енергије упадног јона ( $-\frac{dE}{dx}$ ) у интеракцији са електронима у зависности од енергије јона има карактеристичан облик (Слика 8).



Слика 8. Зависност зауставне моћи од енергије јона

Облик криве је у директној вези са емпиријским пронађеним енергетским „праговима“ за детекцију одређених јона за дати тип детектора. За тешке јоне високих енергија овај принцип је нарушен. Трагови нису откривени зато што брзи јони продукују велики број тз.  $\delta$  електрона. Ови електрони већину примљене енергије односе изван области трага тако да се он изгуби у процесу нагризања. Зато се у истраживањима уводе различите величине, које не дефинишу тоталан губитак енергије јона у детектору већ део изгубљене енергије који је релевантан за формирање трага. Једна од тих величина је примарна јонизација ( $J$ ) која искључује из разматрања јонизацију  $\delta$  електронима а изводи се из Бете-Блохове формуле (2.2):

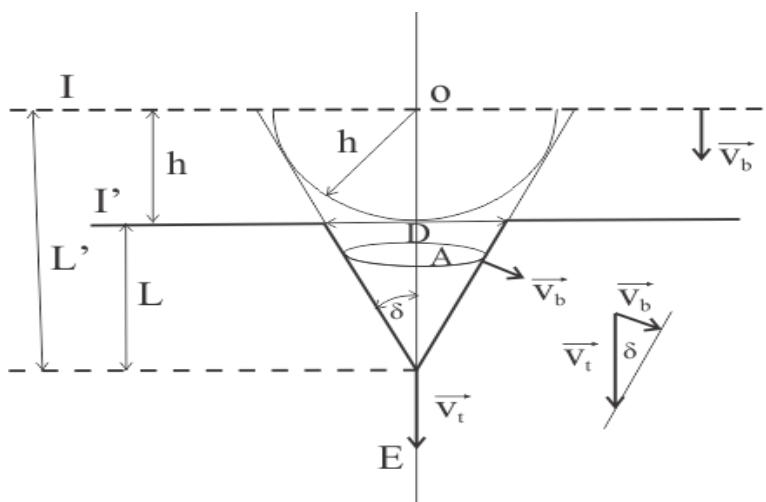
$$J = \frac{C_1 C_2 Z^{*2}}{I_0 \beta^2} \left[ \ln \left( \frac{W_{\max}^2}{I_0} \right) - \beta^2 - \delta + K \right] \quad (2.2)$$

После излагања детектора јонима, формирају се трагови који су малог радијуса (реда десетак нанометара). Тако настали „скривени“ трагови, називају се још и латентни трагови, могуће је видети електронским (TEM, SEM,...), али не и оптичким микроскопом.

### 2.1.2. Геометрија развоја трага

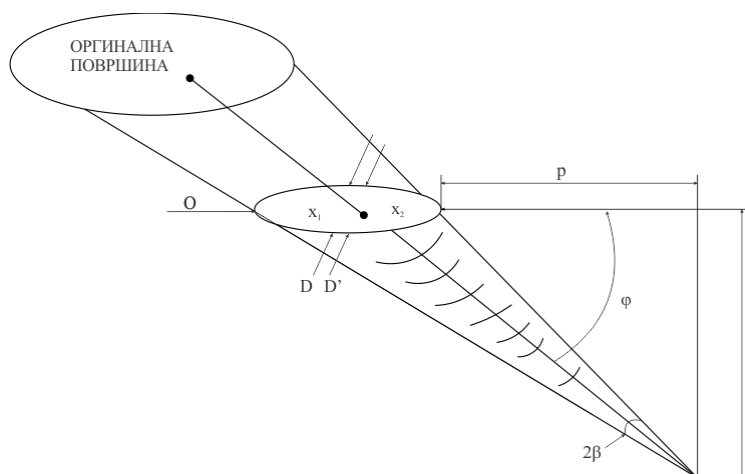
Најједноставнији случај развоја трага односи се на случај када упадна честица улази у детектор под нормалним углом у односу на површину детектора како је то приказано на слици 9, где је:  $I$  је иницијална површина детектора,  $I'$  је површина након нагризања,  $V_t$  је брзина нагризања дуж трага честице,  $V_b$  је брзина нагризања неекспонираног подручја детектора,  $O$  је улазна тачка,  $E$  је крајња тачка честице у детектору материјала а  $OE=R$  је домет честице у детектору материјала. Растојање између  $I$  и  $I'$  је дебљина слоја уклоњеног нагризањем и обележено је са  $h$ , тј.,  $L'$  је укупни пређени пут раствора дуж трага честице а  $L$  је дубина трага.

У једном аспекту, развој трага је аналоган простирању таласа. По Хајгенсовом принципу, свака тачка на таласном фронту је извор новог сферног таласа. У случају настајања трага, хемисфера са радијусом  $h=V_bt$  (гдје је  $t$  време нагризања) формира се око сваке тачке на детектору површине, осим у правцу путање честице, где нагризање напредује брзином  $V_t$  [Nikezić&Уц, 2004]. Показује се да на сваком детектору подесан растварач изазива већу брзину нагризања дуж трага тешке наелектрисане честице  $V_t$  од брзине којом растварач скида површину неекспонираног дела детектора  $V_b$ .



Слик 9. Случај када јон упада под правим углом

Развој трага вођен је односом  $V=V_t/V_b$ , а развој трага није могућ ако је  $V \leq 1$ . Другим речима, услов  $V > 1$  мора бити испуњен да би се формирао траг. Угао  $\delta$  на слици 9. назива се локални угао нагризања. Из сличности троуглова на слици 9. може се закључити да је  $\sin \delta = 1/V$ . Како је раније речено, нагризање напредује у свим смеровима брзином  $V_b$  осим дуж путање честице где нагризање иде брзином  $V_t$ . У три димензије, траг је конус са углом  $\delta$ , која се добије ротацијом зида трага свуда по путањи честице. Круг А на слици 9. представља резолуцију тачке на зиду трага по путањи честице. Током нагризања, зид трага се помера паралелно сам себи. Како јони могу падати под различитим угловима интересантан је приказ на слици 10. када је упадни угао јона мањи од  $90^\circ$ .



Слика 10. Општији случај када је упадни угао мањи од  $90^\circ$

Постоје различите фазе развоје геометрије трага. Геометрију настајања трага разматрали су многи аутори: Henke, 1971; Somogyi, 1973; Paretzke, 1973; Somogyi, 1980; Fromm et.al 1996; Barillon et.al., 1997; Ditlov, 1995; Nikezić&Kostić, 1997; Nikezić 2000; Nikezić 2003; Fewes A.P. 1982.

Nikezić&Yu (2006) су развили компјутерски програм у програмском језику Fortran 90 под називом TRACK\_TEST који се користи за рачунање параметара, цртање профила и одређивање контуре отвора трага алфа честица у LR 115 и CR-39 детектору. Резултати програма су експериментално потврђени за трагове алфа честица.

Nikezić&Yu (2008a) су такође развили и модел простирања светлости кроз нагрижене трагове алфа честица. У раду [Nikezić&Yu, 2008b] дат је опис компјутерског



програма под називом TRACK\_VISION који су аутори развили за одређивање оптичког појављивања трагова у нуклеарним траг материјалима, као последица озрачивања лаким јонима и касније хемијским нагризањем.

Брзина нагризања дуж трага тешке наелектрисане честице ( $V_t$ ) је функција наелектрисања, масе и енергије наелектрисане честице и особина детекторског материјала. За велико  $Z$  (фисиони фрагменти) однос  $V_t/V_b$  достиже вредност од  $10^4$  па трагови имају дугачак, игличаст, квази-цилиндричан облик са малим отвором у односу на дужину (пречник  $D$  је након времена нагризања  $t$  приближно  $2V_b t$  а домет јона  $V_t t$ ). За  $\alpha$  честице однос  $V_t/V_b$  није велики, у случају детектора CR-39 између 2 и 3. Величине  $V_t$  и  $V_b$  такође зависе од температуре и концентрације раствора. Повећавање моларитета хемијских реагенаса, температуре и времена нагризања доводи до повећања димензије трага.

За детекторе радона најважније је како на бази измерене густине трагова добити концентрацију радона изражену у  $Bq/m^3$ . Након експонирања, нагризања и бројања помоћу одговарајућих система, као интегрални одговор сваког траг детектора добија се густина трагова  $\rho$  (број трагова по  $cm^2$ ). Под претпоставком да се ради о униформној расподели густине трагова по површини детектора,  $\rho$  се дефинише као [Fleischer et.al. 1980]:

$$\rho = \frac{K}{\tau_r} \int_t^{t_e} C(t) dt \quad (2.3)$$

где су:  $\tau_r$  - средње време живота радона,  $C(t)$  - концентрација радона у ваздуху [ $atom/m^3$ ] у околини детектора у времену,  $t$  и  $t_e$  почетак и крај времена излагања, и  $K$  – означава калибрациони коефицијент и дефинише се као [Šutej et.al. 1988]:

$$K = \frac{\tau_r}{C(t)} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{A_0(t)} \frac{d\rho}{dt} \quad (2.4)$$

где су:  $A_0(t)$  - концентрација активности радона у ваздуху [ $Bq/m^3$ ] у времену  $t$ , и  $d\rho/dt$  - брзина продукције трагова ( $trag/cm^2 h$ ).

## 2.2. Активна метода мерења радона

Постоји више техника које омогућују стално праћење концентрације радона у ваздуху. Инструменти који се најчешће употребљавају за мерење концентрације радона заснивају се на детекцији алфа честица, као на пример импулсна јонизацијска комора (PIC), јонизацијске коморе, сцинтилацијони детектори са цинк сулфидом [ZnS (Ag)], спектрометри алфа честица који користе силиконске диоде, спектрометри гама-зрачења, NaI (Tl)/Ge (Li) детектори. Помоћу континуираног праћења у сваком тренутку се може уочити варијација концентрација радона у току мерења. Понекад долази до великих варијација у концентрацијама радона што доводи до закључка о утицају великог броја параметара на ниво радона. За добијање поузданих резултата важно је имати довољан број мерења да би се дошло до статистички тачних читавања.

Једна од често коришћених техника је алфа спектрометријска метода. Предност ове методе је могућност електронског раздвајања енергије сваке емитоване  $\alpha$  честице, а тако се може одредити од ког изотопа ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$  и других) потиче детектована  $\alpha$  честица. Помоћу алфа спектрометријске методе могуће је раздвојити „стари“ од „новог“ радона, радон од торона, сигнал од шума и екстреман низак и стабилан фон [Durrige, 2000].

Детектори  $\alpha$  честица су најчешће полупроводнички материјали и то обично силицијум у којима се енергија упадног  $\alpha$  зрачења директно претвара у електрични сигнал. У колико се посматра само пик који потиче од изузетно краткоживећих потомака (нпр.  $^{218}\text{Po}$  са периодом полураспада од 3 минута), а игноришу се потомци са релативно дугим периодом полураспада који заостају од претходног мерења ( $^{214}\text{Po}$  периода полураспада 27 мин.) ови детектори могу да се користе и за брзу оцену концентрација радона. Помоћу овог уређаја могуће је одредити пукотину или шупљину унутар просторије где долази до продирања радона процесом дифузије.

Електронски уређаји за праћење нивоа радона тренутно користе три типа детектора алфа честица:

1. Лукасове или сцинтилационе ћелије
2. Јонске коморе,
3. Чврсти детектори алфа честица

Сваки од наведених типова детектора има своје предности и недостатке у односу на друга два. Сваки од њих се може користити за бројање алфа честица са ниским нивоом шума.

Начешће коришћени комерцијални уређаји за континуално мерење концентрације радона су: AlphaGuard PQ 2000PRO, Rad 7 и RadonScout.

AlphaGuard PQ 2000PRO (произвођач Genitron-a, Немачка), заснован је на импулсној јонизационој комори (PIC). Има запремину од  $620 \text{ cm}^3$  а његов радни напон је 750V. Начин рада је 3D алфа спектрометрија. Највеће предности овог система су брз одговор, велика осетљивост (1 CPM, импулс у минути) при  $20 \text{ Bq/m}^3$  и широк динамички опсег мерења ( $2 \text{ Bq/m}^3$  –  $2 \text{ MBq/m}^3$ ). У режиму дифузије, само  $^{222}\text{Rn}$  пролази кроз филтер од стаклених влакана у комору (са коефицијентом задржавања 99,9 %), док филтер задржава продукте радона. Филтер такође штити унутрашњост коморе од контаминације честицама прашине и аеросолима. Монитор је такође опремљен и унутрашњим системом контроле квалитета, који врши низ контрола и провера у понављајућем режиму.

Radon Scout Plus (RSP, SARAD немачке производње), је уређај чији се детекциони систем базира на полупроводнику. Има широк распон мерења ( $0$ – $2 \text{ MBq/m}^3$ ) и ради у режиму пасивне дифузије. Запремина детектора је  $60 \text{ cm}^3$  а временски размак између узимања узорка може да варира од 1 до 255 минута. Користи се техника укупне алфа детекције и осетљивост детектора је  $2 \text{ CPM kBq/m}^3$ . Осим концентрација радона, мери и температуру ваздуха, релативна влажност и барометарски притисак. Детектор не реагује на промене животне средине и промене у атмосфери. Два уређаја истог произвођача, именовани као RSP158 и RSP161, употребљавају се у интеркомпаративном истраживању.

DURRIDGE RAD 7 је тзв. континуални радон детектор. Овај тип детектора је грађен од полупроводничких материјала који претварају алфа зрачење директно у електрични сигнал. Овај уређај ће бити детаљно описан у следећем поглављу.

### 3. МЕТОДЕ И ТЕХНИКЕ ПРИМЕЊЕНЕ У ОВОМ РАДУ

#### 3.1. Пасивне методе мерења радона

Данас степен развоја науке и технологије омогућио је постојање више врста детектора који се примењују за мерење концентрације алфа честица у ваздуху. Чврсти траг детектори разликују се по природи основног материјала, а тиме и по осетљивошћу на различите врсте јонизујућих честица.

Мерење у овом раду вршено је са четири различитих типова траг детектора:

1. CR-39 детектори,
2. Гама 1 детектори
3. CR -39 детектори-RADUET,
4. LR 115 детектори (DRPS/DTPS)

##### 3.1.1. Детектори за мерење радона

Мерење радона вршено је помоћу три врсте детектора који имају исту намену али су од различитих произвођача. Циљ је био да се упореде резултати детектора у истим условима експонирања.

RSKS детектори се састоје од CR-39 филма који је постављен у проводну цилиндричну дифузиону коморицу сачињене од пластике (целулозни естри и поликарбонати). Чврсти нуклеарни траг детектор CR-39 је постављен на дно коморице као што се види на слици 11.



Слика 11. CR-39 детектор

На слици 12 је приказан изглед гама 1 детектора који је коришћен при мерењу радона у овом раду.



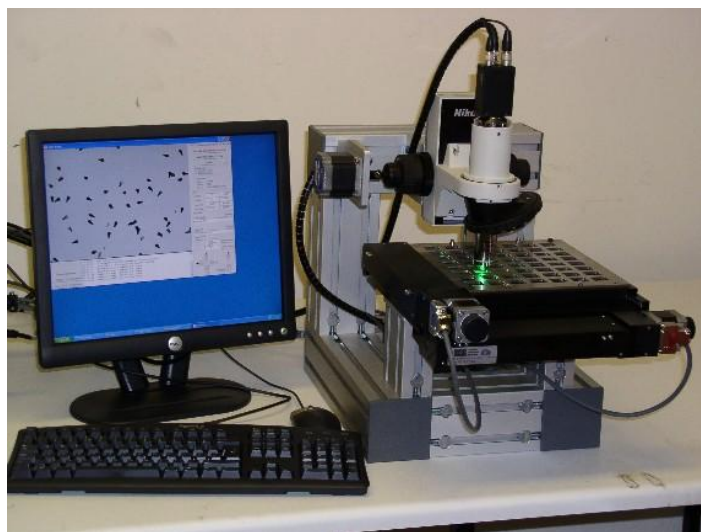
Слика 12. Гама 1 детектор

Након излагања детектора и њиховог повратка у лабораторију, они се отварају а потом се микро филмови одвајају од дифузионе коморе да би се припремили за хемијску обраду.

Трагови оштећења (латентни трагови) се могу учинити видљивим под микроскопом деловањем различитих агенаса који брже нагризају место оштећења од околног неоштећеног материјала, те се као резултат ове разлике у брзини нагризања добије проширени траг. У зависности од енергије, наелектрисања и величине јона, латентни траг може бити пречника 1-10 nm [Durrani&Bull, 1987].

Поступком нагризања, трагови постају већи, са дијаметром у интервалу 10 - 20  $\mu\text{m}$  [Nikezić&Yu, 2004]. Нагризање микро филмова се врши у посуди за нагризање. Детектори су хемијски развијани у току 1 сата у 6.25 нормалном раствору NaOH на температури 98 °C. Када су једном извађени из купатила, детектори се исперу, први пут дестилованом водом а затим водом из славине и остављени 30 минута у 2% воденом раствору (дестилована вода) сирћетне киселине да би се прекинуло даље развијање трагова. Раствор за развијање детектора је провераван помоћу термометра и уређаја који је мерио густину NaOH раствора. Након тога су детектори поново испрани и остављени да се суше. После сушења детектора приступа се бројању трагова [Radosys, 2008; Carpentieri 2011].

За претрагу и анализу трагова су кориштена два потпуно аутоматизована система (image analysisread-out). Први је TASL system са TASL оперишућим програмом, верзија 10.9 произведен у Енглеској (Слика 13.) [Henshaw, 1992]



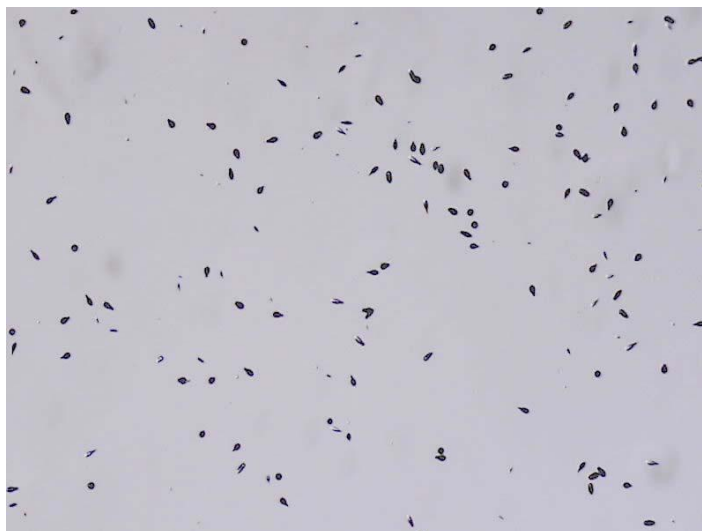
*Слика 13. Тасл систем (TASLsystem).*

Други коришћени систем је Politrack system са програмом Politrack, верзија 4.1 произведен у Италији (Слика 14). Прецизност мерења је евалуирана у условима теренског рада са оба система очитавања поређењем упарених детектора. Медијана коефицијента варијације (CV) измерених концентрација износила је 8% за TASL system и 4% за Politrack [Carpentieri, et.al., 2011].



*Слика 14. Политрак систем (Politracksystem)*

На слици 15 је приказан изглед микро филма након хемијске обраде и бројања трагова помоћу поменутих система за читавање.



Слика 15. Трагова честица на микро филму

### 3.1.2. Детектори за мерење радона и торона

Мерење потомака радона и торона у овом раду вршено је помоћу Детектори CR - 39 (RADUET) и LR 115 детектори (Direct Radon Progeny Sensors/Direct Thoron Progeny Sensors –DRPS/DTPS). За истовремено мерење Rn и Tn коришћени су интегрисани Rn-Tn детектори, комерцијалног назива RADUET [Zhuo, et.al., 2002, Tokonami et.al., 2002].

Детектор се састоји од два CR-39 филма постављена на дно дифузионе коморе димензија  $\phi$  60 mm x 30 mm (Слика 16). Дифузионе коморе се одликују различитим стопама размене ваздуха. Комора са ниском стопом размену ваздуха (LER) региструје Rn, а комора са високом разменом ваздуха (HER) региструје Tn и Rn. Rn гас у ваздуху долази до LER коморе кроз веома уске невидљиве канале, док Tn дифундује кроз равномерно распоређене монтажне рупе на зиду HER коморе. Доња граница детекције (LLD) се израчунава на основу ИСО Водича [International Organization for Standardization (ISO), 2010].



Слика 16. Детектор Cr-39 (РАДУЕТ)

LR-115 тракасти детектори садрже DTPS и DRPS апсорбере за мерење концентрације радонових и торонових потомака. DTPS су апсорбери (алуминијумске фолије дебљине 50  $\mu\text{m}$ , Слика 17) унутар LR-115 тракастих нуклеарних детектора који селективно региструју само  $\alpha$  честице енергије 8.78 MeV. Њих емитује  $^{212}\text{Po}$ , који је створен у радиоактивном распаду атома  $^{212}\text{Pb}$  и  $^{212}\text{Bi}$  наталожених на површини апсорбера. DRPS апсорбери су дебљине 37  $\mu\text{m}$  и користе се углавном за детекцију  $\alpha$  честице емитоване из атома  $^{214}\text{Po}$  (енергије 7.69 MeV) створеног распадом атома  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$  наталоженог на површини апсорбера. Истовремено, они су дизајнирани да дају равнотежну еквивалентну концентрацију торон/радон (EETC/EERC) и не мере концентрацију у гасу. Кроз велики број експеримената, осетљивост ових детектора у природном унутрашњем (indoor) окружењу је приближно константна и износи 0.94  $\text{Trcm}^2\text{d}_1/\text{EETC}$  ( $\text{Bqm}^3$ ) за DTPS и 0.09  $\text{Trcm}^2\text{d}_1/\text{EETC}$  ( $\text{Bqm}^3$ ) за DRPS [Mishraetal., 2009].



Слика 17. LR 115 детектори (Direct Radon Progeny Sensors/Direct Thoron Progeny Sensors – DRPS/DTPS).



Наведени DTPS/DRPS детектори су хемијски обрађени стандардним протоколима нагризања у 2.5 NNaOH. Густине трагова су претворене у ЕЕСТ и ЕЕСР користећи коефицијенте осетљивости у природном унутрашњем окружењу поменуте у претходном пасусу.

### **3.2. Активна метода мерења радона**

Мерење концентрација радона активном методом је у овом раду вршено помоћу уређаја Rad 7, који је произвела фирма Durrige Company Inc[Durrige, 2000].

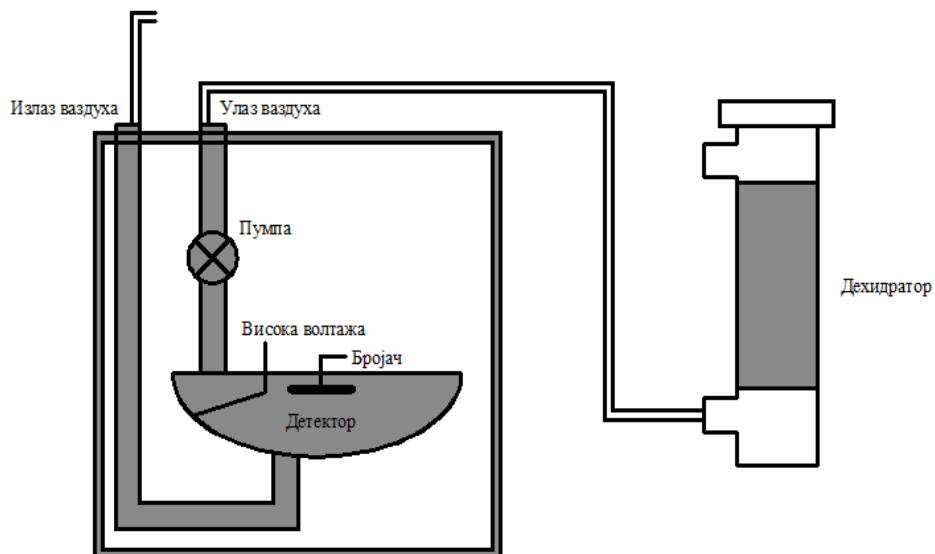
Rad 7 је детектор типа алфа-спектрометра. Унутрашњост уређаја се састоји од полусфере запремине  $0,7 \text{ dm}^3$  која је обложена са унутрашње стране материјалом који је добар електрични проводник. У средишту сфере налази се раван силицијумски  $\alpha$  детектор. Високи напон одржава разлику потенцијала између унутрашњег проводника 2000 - 2500 V, стварајући на тај начин електрично поље унутар запремине ћелије. Електрично поље усмерава позитивно наелектрисане честице ка површини детектора.

Језгра  $^{222}\text{Rn}$  се, унутар коморе, распадају на језгра  $^{218}\text{Po}$  који су позитивно наелектрисани јони. Овако трансформисане честице остају у комори. Услед дејства поља, језгра  $^{218}\text{Po}$  бивају привучена на површину детектора. Када се краткоживећи атом  $^{218}\text{Po}$  распадне на активној површини детектора његова  $\alpha$  честица има 50% могућности да произведе сигнал који је пропорционалан њеној енергији. Даљи продукти распада овог језгра су  $\beta$  честице које систем не може да детектује и  $\alpha$  честице других енергија. Различити изотопи имају различите енергије  $\alpha$  распада који у детектору приоизводе различите сигнале.

Када се потомци радона и торона депоновоани на површини детектора распадноу они емитују  $\alpha$  честицу карактеристичне енергије директно у полупроводнички детектор и у њему генеришу електрични сигнал. Потомак  $^{222}\text{Rn}$  је  $^{218}\text{Po}$  енергије 6 MeV и времена полураспада 3.05 min., а потомак  $^{220}\text{Rn}$  је  $^{216}\text{Po}$  енергије 6.78 MeV и времена полураспада 150 ms. Овај сигнал се појачава и конвертује у дигиталан облик који омогућава микропроцесору га разврста по енергији у меморију инструмента. Rad 7 дели скалу спектра од 0 до 10 MeV на 200 делова тј. сваки канал представља енергију од 0.05 MeV .

Сув ваздух се проводи кроз унутрашњу мерну комору, где се налази детектор, са брзином протока од  $1 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Провођење сувог ваздуха зависи од капацитета рада аутоматске пумпе. Рад пумпе је прилагођен задатим параметрима мерења које задаје сам корисник.

На уласку у мерну комору постоји филтер који спречава улазак радонових потомака, што значи да ће резултат мерења представљати концентрацију радона у ваздуху, а не и концентрацију његових потомака (Слика 18).



Слика 18. Шема унутрашњости уређаја Rad 7



Слика 19. Уређај Rad 7

Код оваквих уређаја (Слика 19) по жељи може да се одабере начин рада, дужина трајања мерења, број циклуса, изглед извештаја, режим рада пумпе. Након завршеног

циклуса мерења извештај се може штампати или помоћу програма "Capture" добити дигитално. Дигитални извештај садржи следеће податке:

- графичка и израчуната средња концентрација активности радона и торона за задати период мерења са припадајућим мерним несигурностима
- кумулативни спектар који приказује енергије алфа распада који се региструју током рада,
- стандардна девијација средње концентрације,
- датум, тачно време почетка и завршетка мерења,
- температура и релативна влажност унутар мерне коморе са корекцијама,
- стање напуњености батерије,
- укупан одброј и одброј по енергетским прозорима и процентуални удео у укупном одброју,
- хистограм средњих концентрација по заданим циклусима.

Паразитни спектри који настају услед електронског шума, неисправног рада спектрометра, вибрације, превисоких температура или оштећења површине детектора се лако могу уочити и разликовати од алфа спектра, јер долази до померања линија, претераног ширења или размазивања линија, повећаног одброја у репу линија или изостанка одброја при дужем времену мерења. Ако се уређајем врши мерење дужи временски период или мерење високих концентрација радона, за поновна прецизна мерења ниских концентрација потребно је пустити пумпу да ради на празно 10 до 30 минута у зависности од концентрације радона током претходног мерења чиме се елиминишу заостали атоми радона.

У току рада неопходно је пратити релативну влажност ваздуха унутар мерне коморе и потребно је држати испод 10%. Ако је влажност ваздуха већа од 10% сматра се да мерења нису извршена у регуларним условима, те је потребно одвлажити силкагел и мерну комору оставити да ради у празно, како би се релативна влажност смањила до прихватљивог нивоа [Durrige, 2000].

Предности активне методе мерења су:

- концентрације радона се могу видети тренутно,
- током мерења се види динамика промене концентрације радона што је важан податак при одређивању доза,
- могућа је брза детекција места на којима радон излази из земље и улази у зграде,
- могу се користити за мерења радона у земљи, ваздуху и води,
- интервали мерења су флексибилни,
- осим радона мере и торон.

Може се закључити да су за мерења радона у кућама и ремедијацију у случају високих концентрација, обе методе важне и надопуњују се.

Инструмент Rad 7 (s/n: 2039) коришћен у овом раду је еталониран од стране произвођача 2008. године, а потом интеркомпариран у Румунији, Cluj, интеркомпарација током конференције FERAS, 2012. године. Интеркомпарација је показала да је одступање од средње вредности у односу на еталон била унутар 3%, што је за овакав тип мерења више него добар резултат који показује, тачност, временску стабилност и поузданост инструмента. Највећи недостатак овог инструмента је што снижавање релативне влажности ваздуха испод 10% захтева повремено сушење силика гела. Учесталост сушења зависи од релативне влажности средине где се врши узорковање па може варирати од дневне до недељне.

### **3.3. Мерење концентрације атмосферских јона**

Мерење концентрације тј. бројчане густине атмосферских јона ( $n^{\pm}$ ), као и мерење електричне проводљивости ваздуха је могуће коришћењем њихових електричних својстава. Gerdien је развио инструмент за мерења атмосферских јона, данас познат као "Гердианов кондензатор" (Gerdien, 1905).

Инструменти за мерење јона могу бити интегрални, као што је то Гердиенов цилиндрични аспирациони кондензаторски бројач или вишеканални јонски спектрометар који сваку класу тј. величину јона мери посебно. Вишеканални спектрометри су робусне и

скуп инструменти који нису прилагођени за теренска мерења. Из тог разлога је у Институту за физику из Београда започет развој асприационих гердианових детектора јона који су после више успешних верзија добили форму интегралног јонског спектрометра који има могућност да раздвајања јона по величинама.

Цилиндрични детектор јона CDI-06 (Слика 20) је развијан у периоду од 2004. до 2008. године коришћен је при изради магистарске теме аутора овог доктората.

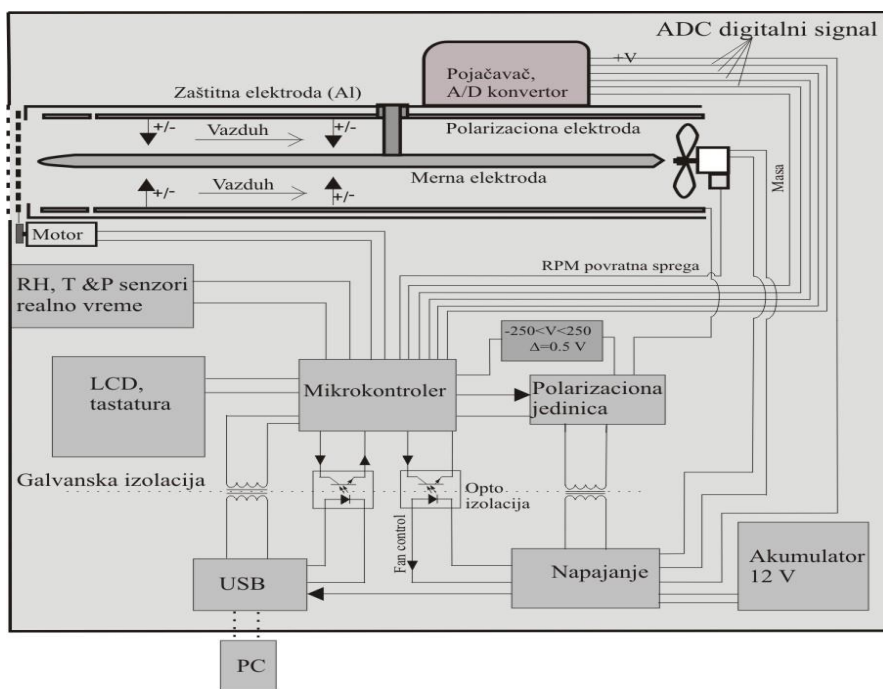


Слика 20. CDI-06

Рад јонског спектрометра (CDIS) (Слика 21) се заснива на провлачењу ваздуха кроз систем коаксијалних електрода променљивог напона. Јони истог поларитета као и поларизациона електрода се од ње електростатички одбијају ка средини, тј. мерној електроди, где депонују своје наелектрисање (сваки јон носи  $\pm 1.6 \cdot 10^{-19}$  C). Тај мали струјни сигнал ( $\geq 10$  fA) се појачава помоћу CMOS двоструког операционог појачавача LPC662 са виртуелном нулом који се користи као инвертујући струјни појачавач. Вредност мерног отпорника је  $1 \text{ G}\Omega$ . Сигнал из појачавача се затим дигитализује помоћу A/D конвертора који ради на  $\Sigma$ - $\Delta$  принципу и оптимизован је за одбацивање сметњи електричне мреже од 50 Hz. Оваква дигитализација сигнала омогућава аутоматско нуловање система, аквизицију мерених података и аутоматску контролу рада преко Atmel RISC микроконтролера. Мерени подаци се приказују на LCD дисплеју у јединицама  $\text{ions}/\text{cm}^3$  и складиште на SD картицу или директно на компјутер у Excel формату. Суви акумулатор обезбеђује аутономију рада инструмента од минимум 12 сати. Комплетан мерни систем, укључујући и јединицу за генерисање поларизационог напона је галвански одвојен од мерног, напајачког дела и USB конекције. Осетљивост инструмента је

ограничена резолуцијом AD конвертора 1.6 fA али се због шума мерна несигурност процењује на  $\pm 5\%$  под идеалним условима.

Раздвајање јона по величини код интегралних детектора јона се врши променом поларизационог напона или променом протока ваздуха кроз електродни систем. У моду у ком се врши скенирање предвиђена је степенаста промена поларизационог напона у 30 корака у трајању од минимум 80 секунди по једном скену (што је дуже скенирање мања је мерна грешка). Између свака два скена врши се аутоматско нуловање система, тј. мерење "нултог" сигнала (насталог услед дрифта нуле појачавача) који се одузима од мереног сигнала. Избор дужине и броја скенова као и поларизационих напона се вршити директно на тастатури детектора или преко компјутера. Да би се повећао горњи опсег скенирања јона са 2 на 3 nm, потребно је да се максимална вредност поларизационог напона повећа са 60 V (колико је на CDI-06) на 200 V.



Слика 21. Шема рада Цилиндрични детектор и спектрометар јона (CDIS).

## 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД

### 4.1. Избор локације

Систематско истраживање концентрације радона у Републици Српској на релативно ограниченој области, коју обухватају основне школе на подручју Града Бања Луке, започето је као пилот студија 2011 године.

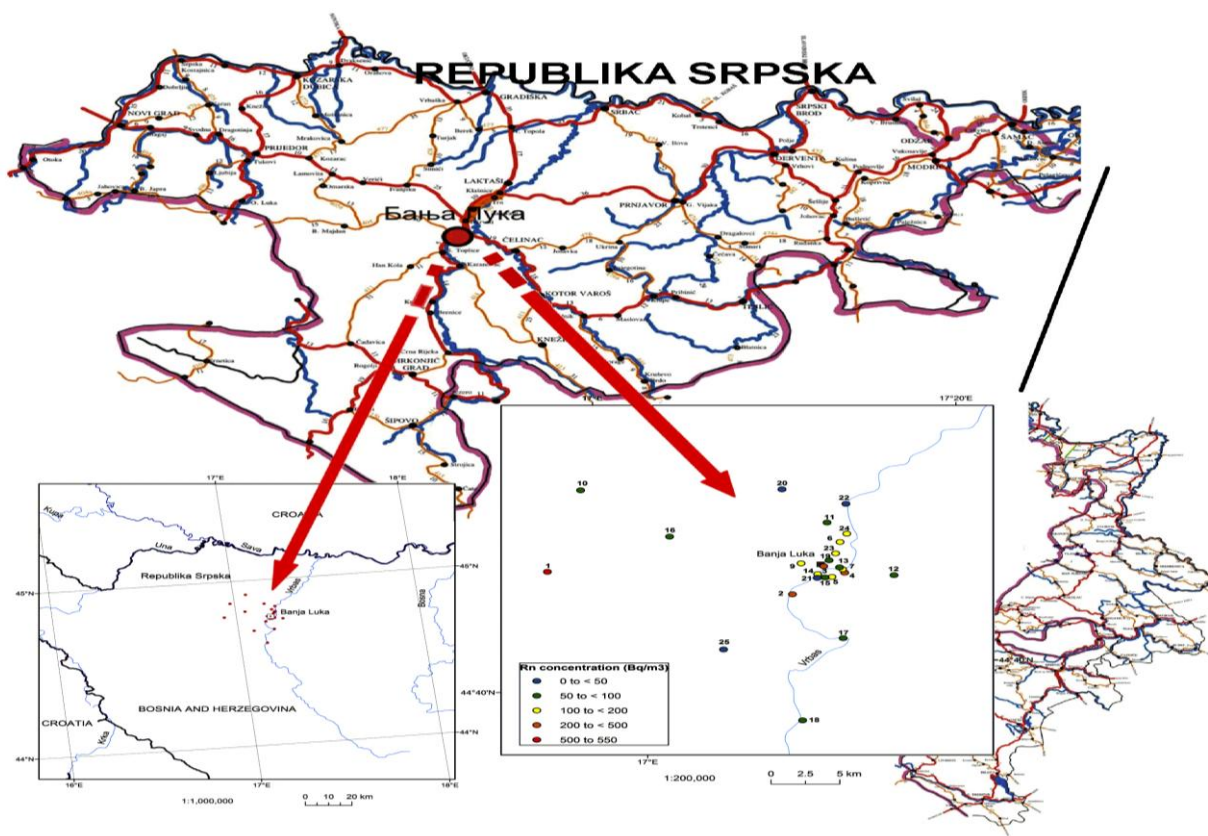


Слика 22. Географска карта Републике Српске (Бања Лука)

Бања Лука се налази на западном делу Босне и Херцеговине (Слика 22), највећи је град у Републици Српској у коме живи око 200 000 становника и овај простор обухвата површину од 1600 km<sup>2</sup>. Град Бања Лука лежи уз слив реке Врбас, централни део града лежи на надморској висини од око 163 m и окружен је терцијарним (Палеогеним) брдима. Кватернарне наслаге глине, кварцног песка и шљунка представљају прелаз са долине на планински терен. Површина града може се поделити на четири дела и то: равно дно долине (где се већина школа налази), алувијалне терасе, брда која окружују долину и целе планине Динарида крећу на југ. Површина масива (400-1338 m надморске висине) у јужном делу града се састоји од кречњака и формације доломита.

Године 1969, два разорна земљотреса (6,0 и 6,4 степени Рихтерове скале) оштетили су многе зграде у Бањој Луци. Град је био у развоју низводно, а већина насеља изграђена су после Другог светског рата и после земљотреса 1969. године. Током године у подручју града деси се већи број и мањих земљотреса. Као такав представља потенцијално подручје природне активности јер је познато да током појаве земљотреса долази до померања стена и тиме се отварају пукотине за дифундовање радона из унутрашњости земље на површину. Континуирано мерење радона има велики значај, јер повећане концентрације у одређеном периоду могу да буду добар прекурсор (предсказатељ) евентуалних земљотреса [Ghosh et al., 2009].

Географска мапа означених локација узрокованих школа (Слика 23) показује локације 25 школа у којима су изложени детектори.



Слика 23. Географска мапа означених локација узрокованих школа (лево на слици) у градском подручју Бања Луке и концентрације радона узоркованих школа (десно на слици)



#### 4.2. Дизајн теренског рада

Циљ овог рада је да се мере концентрације радона у школама (основне) јер у њима борави најмлађа популација и кућама у пречнику 2 km око школа јер је то подручје најнасељеније и тиме би био директно третиран већи дио популације. Детектори су били изложени у 25 школа и у 83 куће. Врста и број детектора који су постављени налази се у Табели 5.

Табела 5. Врста и број детектора који су постављени у школе и куће

Врста и број детектора	Број детектора школе	Број детектора куће	Укупан број детектора
CR-39	29	85	114
Gama 1	44		44
Raduet	25	19	44
DRPS/DTPS	25	42	67
Укупно	143	146	289

Прву групу детектора чине детектори CR-39 којима је извршено мерење у 25 школа. Ови детектори служе за дуготрајна мерења и излагани су годину дана. Постављено је укупно 29 детектора овог типа од тога је 10 постављено у зборнице, 4 у канцеларије и осталих 15 у ходнике. У 23 школе детектори су постављени у приземљу и у 2 школе на спрату. Сви детектори у школама су постављени на унутрашње зидове просторије и причвршћени уз сами зид. Табела са основним подацима детектора CR-39 за школе (назив и локација школе, број детектора, време излагања, распоред по просторијама, спратност, ГПС координате и надморска висина) налази се у Прилогу 1 (Табела 34).

У овом раду су детектора CR-39 третиране и куће, које се налазе у околини школа. На основу резултата краткотрајних мерења гама 2 детекторима и мерења уређајем Rad 7 процењена су подручја у околини школа са повишеном активношћу радона. Тако је третиран већи број кућа у пречнику до 2 km у околини школа, које су показале повишену концентрацију радона у односу на број кућа у околини школа са ниском активности.

Укупно је постављено 85 детектора Cr-39, 70 је постављено у дневни боравак а 15 детектора у спаваћим собама и сви детектори у кућама су постављени на растојању 5-10

см од зида. Од 85 детектора 64 су постављена у приземљу, а 21 детектор на спрату. Табела са основним подацима CR-39 за куће ( локација куће, број детектора, време излагања, распоред по просторијама, спратност, ГПС координате и надморска висина) налази се у Прилогу 1(Табела 35).

Другу групу траг детектора чине Гама 1 детектори и они су постављени у 25 школа. Ови детектори служе за дуготрајна мерења и време излагања је годину дана. Укупно је постављено 44 детектора од тога: 10 у зборнице, 13 у канцеларије, а 21 детектора се налази у ходницима. Од 44 детектора 35 су постављени у приземљу и 9 на спрату. Табела са основним подацима Гама 1 детектора (назив и локација школе, број детектора, време излагања, распоред по просторијама, спратност, ГПС координате и надморска висина) налази се у Прилогу 1 (Табела 36).

Детектори CR -39 ( RADUET) су трећа врста детектора која је коришћена у овом раду. Ови детектори су постављени у 25 школа. Сви детектори су постављени тако да буду минимум 0,5 m од плафона и од суседног зида да неби дошло до грешака насталих сабирањем концентрација торона са мереног и суседних зидова. У свакој школи (у некој од просторија) се налазио по један детектор овог типа. Од укупно 25 детектора, 10 се налазило у зборницама, а 15 у ходницима. У 23 школе детектори су постављени у приземљу, а у 2 школе на спрату. Табела са основним подацима детектора Cr -39 (РАДУЕТ) налази се у Прилогу 1 (Табела 37).

Радует детектори су постављени и у 19 кућа које се налазе у пречнику до 2 km у околини школа. Укупно је постављено 19 детектора, од тога је 15 постављено у дневни боравак и 4 детектора у спаваће собе. Од 19 детектора 12 су постављени у приземљу и 7 детектора на спрату. Табела са основним подацима детектора Cr -39 (РАДУЕТ) налази се у Прилогу 1 (Табела 38).

Четврта врста детектора која је коришћена у овом раду су LR 115 детектори (DRPS/DTPS) и они су постављени у 25 школа. У свакој школи (у некој од просторија) се налазио по један детектор овог типа. Од укупно 25 детектора, 10 детектора је постављено у зборнице а 15 у ходнике. У 23 школе детектори су постављени у приземљу а у 2 школе на спрату. Табела са основним подацима LR 115 детектори (DRPS/DTPS) (назив школе, локација, број детектора, време излагања, распоред по просторијама, спратност, ГПС координате и надморска висина) налази се у Прилогу 1 (Табела 39).

LR 115 детектори (DRPS/DTPS) су постављени и у 42 куће које се налазе у пречнику од 2 km у околини школа. Укупно је постављено 42 детектора, од тога је 33 постављено у дневни боравак и 9 у спаваће собе. Од 42 детектора 27 су постављени у приземљу а 15 детектора на спрату. Табела са основним подацима LR 115 детектори (DRPS/DTPS) налази се у Прилог 1 (Табела 40).

Уређај Rad 7 је постављен у свих 25 школа. У 23 школе мерење је вршено у приземљу, а у 2 школе на спрату (школа Мирослав Антић и школа Петар Кочић). Уређај је континуирано мерио по седам дана (пет радних дана и два дана за викенд) у различитим периодима године. Уређај је постављан на под и узрокован је ваздух који се налазио на висини 30 cm од пода. Аквизиција података је вршена сваких 2 сата и то је понављано 84 пута за седам дана. Влажност узрокованог ваздуха није прелазила 10%, а температура се кретала од 17 °C до 25 °C. Просторије у којима је вршено мерење у периоду октобар – април биле су загреваване радијаторима [Ćurguz, et.al., 2013].

Мерење концентрације радона уређајем Rad 7 и атмосферских јона цилиндричним детектором јона вршено је у две школе.

#### **4.3. Статистика обраде резултата**

Статистичка обрада и анализа података је урађена кориштењем статистичког програма: XLStatPro 7.5. и Minitab 16 . Обрада и анализа резултата се састојала од следећих процедура:

- дескриптивне статистике: минимална вредност (мин), максимална вредност (мах), аритметичка средња вредност (АС), стандардна девијација (СД), мерна несигурност (МН), геометријска средња вредност (ГС), геометријска стандардна девијација (ГСД) .
- хипотеза за дистрибуцију резултата (нормална/лог-нормална функција) су тестирани помоћу: Kolmogorov-Smirnov (KS) теста.
- хипотеза хомогености у групама, што је такође услов за нормалну расподелу је тестиран помоћу: Bartlett (B) теста.

У зависности од дистрибуције резултата измерених вредности, примењује се параметарска или непараметарска статистика.

Варијација средњих вредности мерених варијабли је тестирана помоћу: ANOVA (параметриских) и Kruskal-Wallis (KW) (непараметриских) тестова. У случају да је главни ефекат значајан, онда су примењивани: Fisher's LSD - параметриски и непараметарски: Mann-Whitney U (MW) за утврђивање статистички значајне разлике између средњих вредности у подгрупама.

Све анализе су направљене на нивоу поверења од 95% (вероватноћа грешке  $p \leq 0,05$ ).

Дијаграми који су добијени мерењем концентрације радона уређајем Rad 7 обрађени су помоћу програма Origin.

Дијаграми који су добијени мерењем атмосферских јона цилиндричним детектором јона обрађени су помоћу програма Origin.

## 5. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА

### 5.1. Концентрација радона, торона и продуката распада у школама

Дескриптивна статистика свих измерених резултата у школама Бања Луке је приказана у Табели 6. где је: детектор са ознаком  $C_{Rn}(1)$  – гама 1,  $C_{Rn}(2)$ – Cr-39,  $C_{Rn}(3)$ -  $C_{Rn}$   $C_{Tn}$ - концентрација торона мерена радује детекторима, LR 115 детектори (DRPS/DTPS) (EERC –фактор равнотеже за радон и EERT фактор равнотеже за торон).

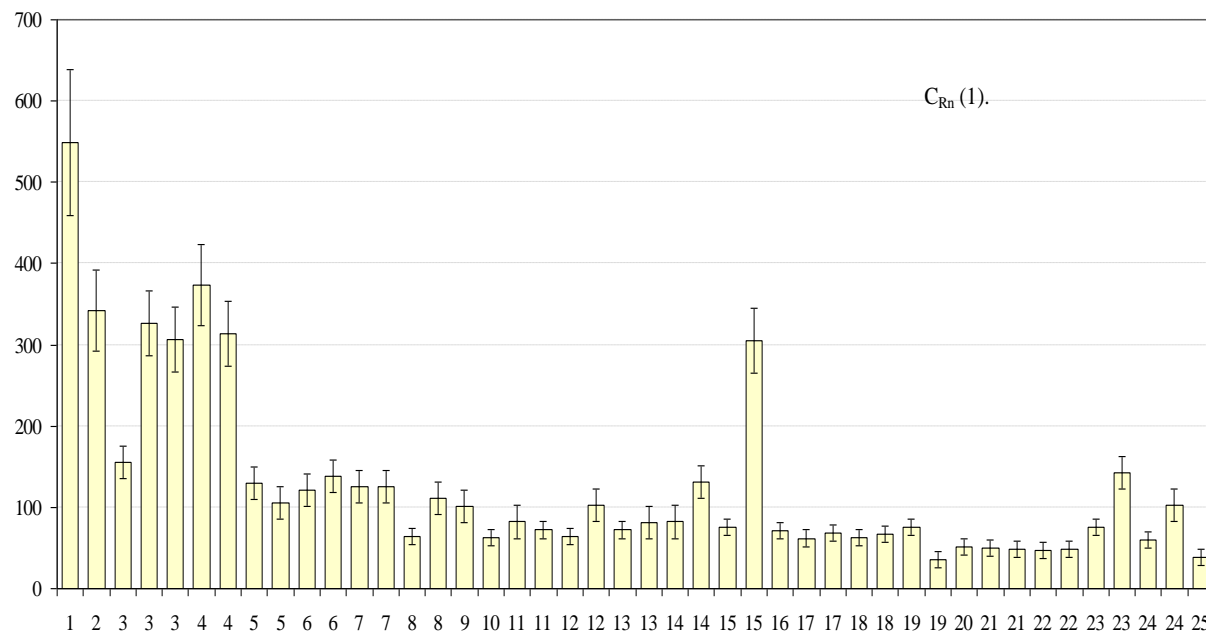
Табела 6. Дескриптивна статистика вредности мерења радона и торона у школама

	$C_{Rn}(1)$	$C_{Rn}(2)$	$C_{Rn}(3)$	$C_{Tn}$	EERC	EETC
Интервал експозиције (дани)	388-396	333-333	183-390	183-390	178-186	178-186
Број мерења	44	28	25	25	25	25
Минимум	36	31	25	7	6.79	0.09
Медијана	82	63	40	57	11.50	0.38
Максимум	549	336	341	198	16.84	1.16
Аритметичка средња вредност	128	82	72	63	11.43	0.52
Стандардна девијација	111	66	85	40	2.47	0.34
Геометријска средња вредност	99	69	50	51	11.15	0.40
Геометријска стандардна девијација	1.94	1.72	2.11	2.07	1.26	2.20

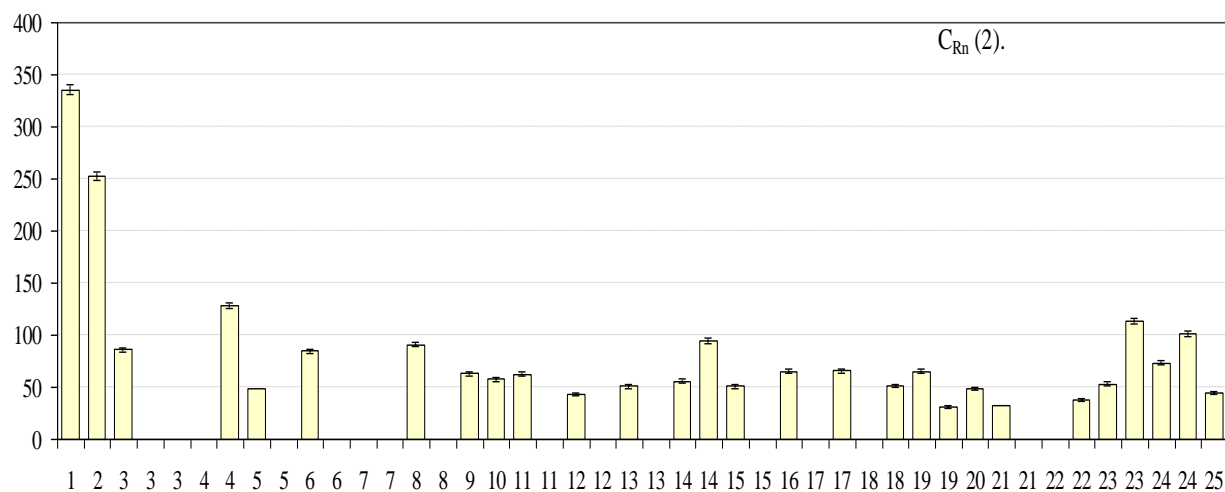
#### 5.1.1. Концентрација радона у школама

##### 5.1.1.1 Поређење резултата концентрације радона измерених са различитим детекторима

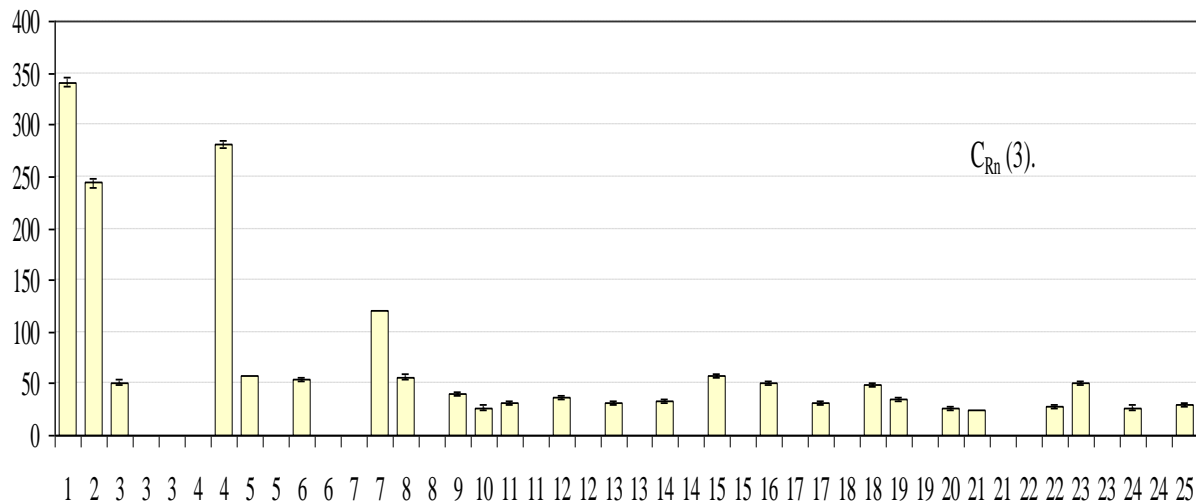
Резултати концентрације радона мерених у школама са три врсте детектора су приказани на слици 24 (а,б,в).



Слика 24а. Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама са CRn (1) детектором



Слика 24б. Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама са CRn (2) детектором



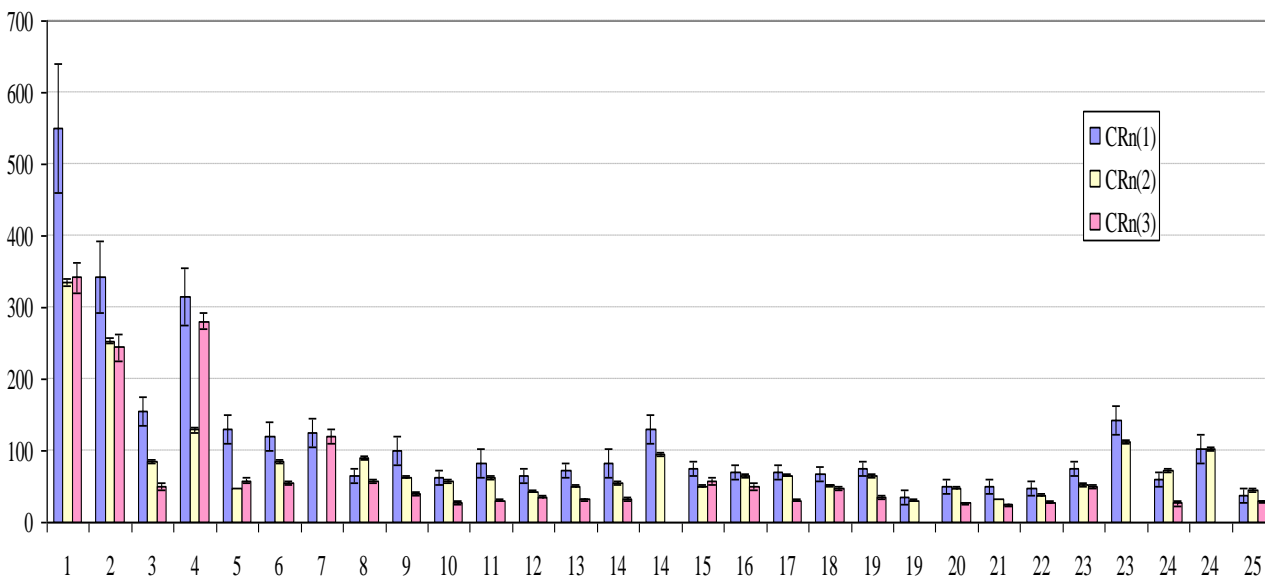
Слика 24в. Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама са CRn (3) детектором

Од укупно 44 измерених локација са Гама 1 детектором (CRn (1)) у 37 просторија концентрација радона је била мања од  $200 \text{ Bq/m}^3$ , док је већа од  $400 \text{ Bq/m}^3$  била регистрована само у једној. Релативна комбинована мерна несигурност ових резултата је у интервалу од 12 до 28%. Са слике 24 може се видети да концентрације радона мерене у једној школи са истим типом детектора у различитим просторијама одступају једни од других. Разлике се јављају у школи број 3 где је концентрација радона мерена у три просторије и у једној просторији резултат мерења одступа од резултата у друге две просторије. У школама са редним бројевима: 8, 14 15, 19, 23, 24, где су концентрације мерене у по две просторије резултати се разликују једни од других. Ово указује на утицај других фактора на резултате мерења што ће у наредном поглављу бити детаљније анализирано (Слика 24а)

Код CRn-39 детектора (CRn (2)) и CRn-39 (радует) детектора (CRn (3)), све измерене вредности су биле мање од  $400 \text{ Bq/m}^3$ , са највећом фреквенцијом у интервалу до  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Релативне мерне несигурности ове две групе резултата су биле у интервалу од 1 до 5% и 4 до 12%. За разлику од (CRn (1)) где смо имали мерења у најмање 2 просторије у 17 школа са детектором број 2 имали смо дупла мерења само у две школе. У оба случаја

концентрације радона мерене у различитим просторијама су се разликовале (школа 14 и 19) (Слика 24б). Са трећим детектором концентрација радона је мерена само у једној просторији (Слика 24в).

Следечи циљ је био да се види да ли постоји разлика у резултатима мерених на истим локацијама са различитим детекторима. На слици 25 су приказани индивидуални измерени резултати мерени на једној локацији са три типа детектора.



Слика 25. Концентрације радона заједно са индивидуалном мерном несигурношћу измерене у школама на истим локацијама са три типа детектора

Са слике 25 може да се види да од 29 спарених резултата у 11 случајева резултат измерен са CRn (1) детектором већи у однос на концентрацију која је измерена CRn (2) и CRn (3) детекторима (школе се редним бројевима: 1,2, 5,6, 9, 12,13,14, 18,23). На слици 23 су уочљиве ниже концентрације измерене са детектором CRn (3) у односу на детекторе CRn (1) и CRn (2). У циљу детаљније анализе, спарених резултатима, спроведена је даља статистичка анализа, Ова и све остале анализе су спроведене на ln-трансформисаним вредностима да би се умањио утицај екстремних вредности на резултате статистичких тестова. Очигледне разлике у концентрацијама радона су потврђене са два статистичка теста: Wilcoxon (непараметриски) и  $t$ -тест (параметриски) на 95% нивоу поверења. У случају када вероватност грешке  $p$  мања од 0,05 потврђена је унапред постављена хипотеза да постоји статистички значајна разлика између спарених резултата.



Вероватноћа грешке сваког појединачног теста за три групе спарених резулата је приказана у Табели 7. Све групе су показале статистички значајне разлике ( $p < 0,05$ ).

Табела 7: Тестирање значајности разлике међу спареним концентрацијама радона измерених на истој локацији са три типа детектора. Ефекат је значајан за  $p < 0,05$ .

	N	t-test ( $p$ )	Wilcoxon ( $p$ )
$\ln(\text{CRn1}) - \ln(\text{CRn2})$	28	$<0.0001$	$<0.0001$
$\ln(\text{CRn1}) - \ln(\text{CRn3})$	25	$<0.0001$	$<0.0001$
$\ln(\text{CRn2}) - \ln(\text{CRn3})$	24	0.001	0.002

Имајући у виду да су сви коришћени детектори комерцијално доступни на тржишту и да су анализе спроведене у акредитованим лабораторијама, једино објашњење разлика у резултатима мерења може да се оправда периодом експозиције и положајем детектора у току експонирања. На пример, време експозиције првог детектора је било дуже за два пролетна месеца (мај и јуни) у односу на детектор бр 2. Детектор број 3 је био експониран у исто време као детектор број 1 на 20 локација а на осталих 5 је био експониран у трајању од 6 месеци. Да би испитали утицај времена експозиције на детектор бр 3. груписали смо резултате у две групе: прва група од 20 детектора (експонираних 13 месеци) и друга група од 5 детектора (експонираних на 6 месеци). Тестирали смо разлике међу групама помоћу Mann-Whitney теста. Постављена хипотеза да постоје разлике није потврђена па су зато резултати узети како једна група (MW,  $p=0,197$ ).

Следећи корак је испитивање корелација међу резултатима концентрације радона мерене са три различита типа детектора. За тај циљ примењен је модел параметарске линеарне регресије. (LR,  $p < 0,0001$  у сва три случаја). Степени корелације међу резултима концентрације радона, изражени преко Пирсоновог коефицијента корелације ( $R$ ) је приказан у Табели 8.

Табела 8. Коефицијенти корелације три типа детектора

		$R$		
		$\ln(\text{CRn}(1))$	$\ln(\text{CRn}(2))$	$\ln(\text{CRn}(3))$
$R$	$\ln(\text{CRn}(1))$	1	0,890	0,916
	$\ln(\text{CRn}(2))$		1	0,870
	$\ln(\text{CRn}(3))$			1

Овај рад је потврдио а било је и очекивано да постоји висока корелација међу измереним концентрацијама различитим типовима детектора (Табела 8).

На крају је годишња концентрација радона у просторијама где се мерило спареним детекторима представљена као средња аритметичка вредност. За квантификацију одступања појединачних резултатат од просечне вредности у просторији одабрано је релативно одступање ( $B$ ) изражено у процентима, дефинисано следећом једначином:

$$B = \frac{|C_{Rn} - C_{Rn\ av}|}{C_{Rn\ av}} \cdot 100\% \quad (5.1.)$$

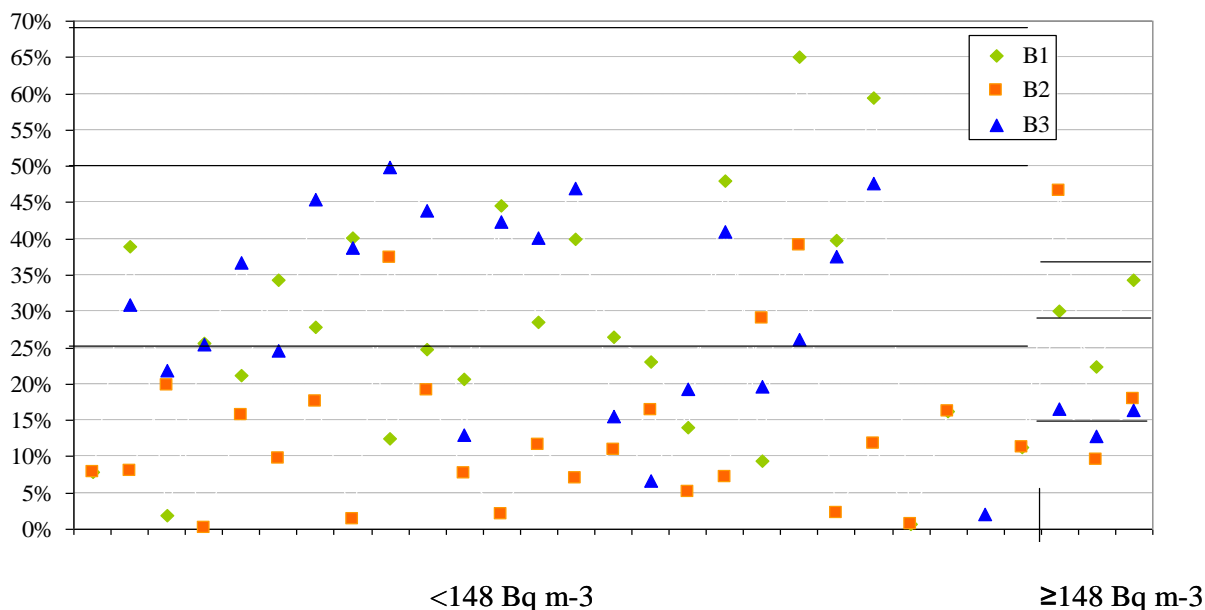
где:  $C_{Rn}$  представља измерену концентрацију радона појединачног детектора, а  $C_{Rn\ av}$ , представља средњу аритметичку вредност концентрације радона (сабране појединачне вредности у једној просторији и подељене са бројем мерења).

Добијене вредности релативног одступања су упоређиване са вредностима садржаним у протоколима Америчке агенције за заштиту животне средине (US Environmental Protection Agency-EPA), (EPA, 1991, 1992, 1993). За репродуцибилност мерења су уведене три граничне вредности које се односе на: контролно ниво (control level), ниво упозорења (warning level) и контролна граница (control limit). Граничне вредности које одговарају за две групе концентрација до  $148 \text{ Bq/m}^3$  и изнад  $148 \text{ Bq/m}^3$ , су наведене у Табели 9.

Табела 9. Граничне вредности релативног одступања (EPA, 1993)

	B(%)	
	$CRn \geq 148 \text{ Bq/m}^3$	$CRn < 148 \text{ Bq/m}^3$
Контролно ниво	25	14
Ниво упозорења	50	28
Контролна граница	67	36

Релативна одступања појединих мерења у односу на средњу концентрацију радона (аритметичка средња вредност појединачних мерења) за сва три типа детектора су представљена на слици 26.



Слика 26. Релативноодступање концентрације радона мерена са тритипа детектора у функцији од средње концентрације радона

На пример, детектор са редним бројем 1, експонирани 13 месеци ( $B_1$ ) у 2 случаја, од укупно 28 вредности, одступање је премашило 50%, (контролна за просечну концентрацију  $<148 \text{ Bq/m}^3$  или  $4 \text{ pCi/L}$  је референтна вредност за US) ниво упозорења. За вредности средње концентрације радона  $<148 \text{ Bq/m}^3$  просечно одступање је  $B_1=27\%$  а за  $\geq 148 \text{ Bq/m}^3$ , средња вредност одступања је  $B_1=29\%$ . За обе просечне концентрације ни једна вредност није премашила контролне границе 67% и 36%.

Одступање само једног мерења (експозиција 11 месеци) показује детектор са редним бројем 2 (одступање  $B_2 > 36\%$ ), за вредности просечне концентрације радона  $\geq 148 \text{ Bq/m}^3$ , три мерења су одступила од нивоа упозорења за  $<148 \text{ Bq/m}^3$  а два за  $\geq 148 \text{ Bq/m}^3$ . За вредности средње концентрације радона  $<148 \text{ Bq/m}^3$  просечно одступање је  $B_2=13\%$  а за  $\geq 148 \text{ Bq/m}^3$ , средња вредност одступања је  $B_2=25\%$ .

Код детектора број 3, где је експозиција била 11 и 13 месеци ни једно мерење не одступа од контролне границе и нивоа упозорења у оба случаја. За вредности средње концентрације радона  $<148 \text{ Bq/m}^3$  просечно одступање је  $B_3=31\%$  а за  $\geq 148 \text{ Bq/m}^3$ , средња вредност одступања је  $B_3=15\%$ .

За поређење могу се користити резултати објављени од стране [Carpentieri, et.al. 2011] о репродукцибилности мерења радона. У том раду су испитиване две групе спарених

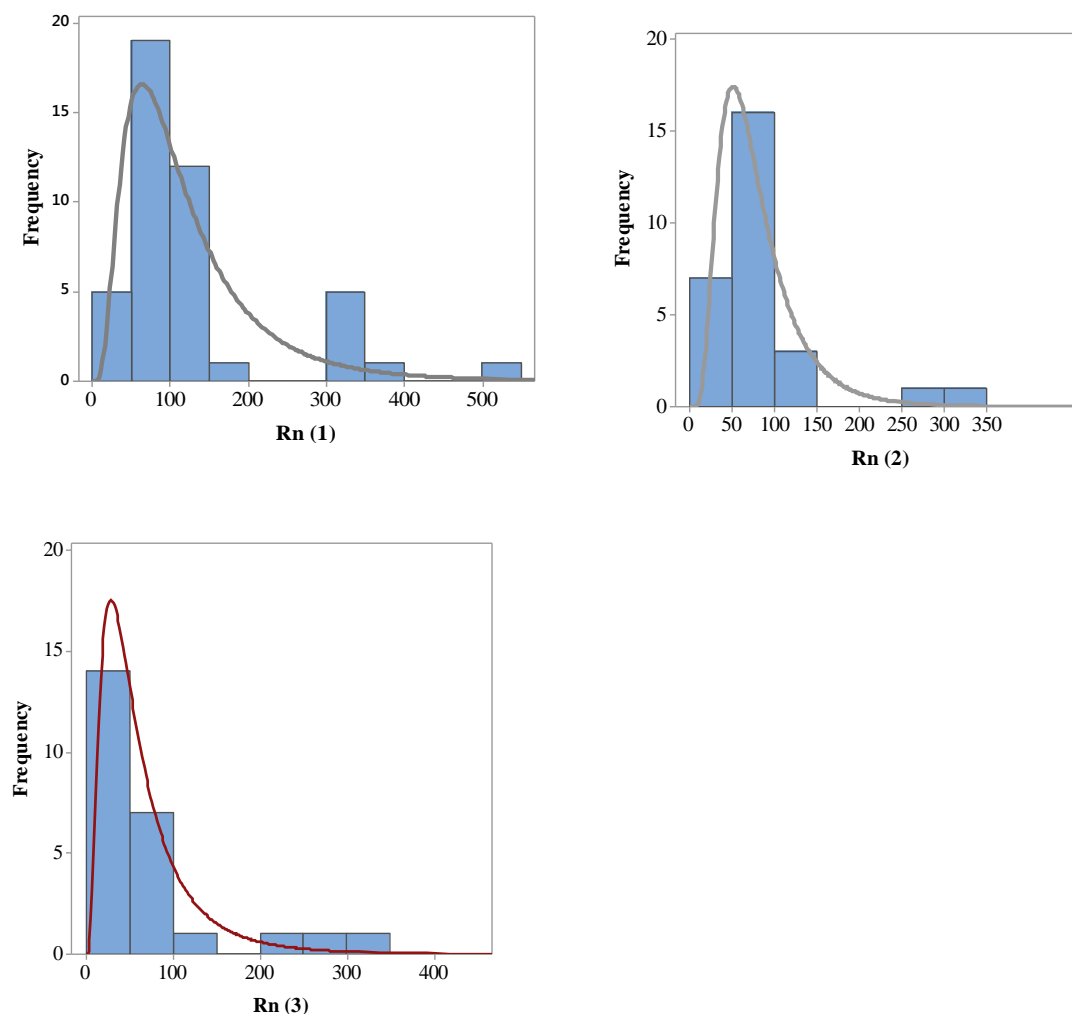
детектора експонираних по 6 месеци, једно после другог. Детектори су анализирани по истој методи, а читани са два независна читачка система. Релативна одступања су са сличном фреквенцијом као у овом истраживању. На пример, у поменутом раду добијена је код 1% детектора (за обе групе детектора) вредност релативног одступања изнад контролног лимита за концентрацију  $\leq 148 \text{ Bq/m}^3$ ; при концентрацијама  $> 148 \text{ Bq/m}^3$ , релативно одступање изнад контролног лимита је регистровано код 1% у првој групи и 1,5% у другој групи, детектора. Највећа одступања се јављају при просечним концентрацијама испод  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

#### *5.1.1.2. Утицај објекта на концентрацију радона*

Следећи корак је био да анализирамо факторе који утичу на концентрацију радона а потичу од самог објекта. У том циљу анализиран је утицај: школе, спрата, просторије и грађевинског материјала.

Пре анализе фактора одредили смо дистрибуцију резултата измерене концентрације радона. Дистрибуција игра важну улогу у избору теста који се примењује. Ако резултати имају нормалну дистрибуцију онда се примењују параметриски тестови ако не онда непараметриски.

Обично концентрације радона има лог-нормалну дистрибуцију. Постављена хипотеза лог-нормалне дистрибуције је тестирана је примењујући Kolmogorov-Smirnov test (KS) на 95% нивоу поверења. У случају када вероватност грешке  $p$  је већа од 0,05 потврђена је унапред постављена хипотеза да постоји статистички значајна разлика између експерименталне и емпиријске расподеле резултата .



Слика 27. Фреквенције измерених концентрације радона фитоване са лог-нормалном функцијом

У Табели 10 су презентовани параметри лог-нормалне функције ( $\mu$ ,  $\sigma$ ), вероватност грешке  $p$  KS теста и потврда значајности расподеле за све четири групе резултата концентрације радона.

Табела 10. Параметри лог-нормалне функције, веројатност грешке ( $p$ ) и значајност KS теста за четири групе мерења концентрације радона.

	Kolmogorov-Smirnov test		Лог-нормална дистрибуција
	$\mu$	$\sigma^2$	$p$
CRn(1)	4,598	0,441	0,216
CRn(2)	4,227	0,292	0,380
CRn(3)	3,919	0,559	0,063

Како што је претходно било наведено, да би се умањио утицај екстремних вредности на крајњи исход тестова, прорачунати су природни логаритми измерене концентрације. Хипотеза да логаритми концентрације радона имају нормалну расподелу је потврђена за три групе мерења (KS,  $p > 0,05$ ).

За анализу фактора који утичу на концентрацију радона узели смо мерења спроведена са детектором број 1. Логаритмовани резултати су груписани по факторима који се испитују: школа, спрат, просторија и грађевински материјал. Варијација средњих вредности по групама мерених концентрација је тестирана помоћу: ANOVA теста. Ефекат се показао статистички значајан: АНОВА,  $p = 0,002$ . Даља анализа је усмерена ка статистички значајним разликама су самим групама. У случају када је била хомогена распоређеност резултата у групама спроведен је параметриски тест Fisher's LSD – параметриски тест а нехомогени резултати су се тестирали непараметарски: Mann-Whitney U (MW) тестом. Хомогеност се испитивала уз помоћ Bartlett's теста ( $p > 0,05$ ).

Број мерења/детектора (бр.) и дескриптивна статистика: минимална вредност (мин.), максимална вредност (мах.), аритметичка средња вредност (АС), стандардна девијација (СД), концентрације радона груписане по школама претстављени су у Табели 11.

Табела 11. Дескриптивна статистика концентрације радона  
у школама Бања Луке

Ред.бр.	Школа	Бр.	Min	Max	AM	SD
1	Алекса Шантић	2	75	142	109	47
2	Бора Станковић	2	60	103	82	30
3	Бранислав Нушић	1	342	342	342	
4	Бранко Ћопић	2	72	81	77	6
5	Бранко Радичевић	2	314	374	344	42
6	Ћирило и Методије	1	63	63	63	
7	Десанка Максимовић	1	51	51	51	
8	Ђура Јакшић	2	72	82	77	7
9	Доситеј Обрадовић	2	75	305	190	163
10	Георгије С. Раковски	2	36	75	56	28
11	Иван Горан Ковачић	2	121	138	130	12
12	Иво Андрић	3	155	327	263	94
13	Змај. Ј. Јовановић	2	48	50	49	1
14	Јован Цвијић	2	82	131	107	35
15	Јован Дучић	2	47	48	48	1
16	Милан Ракић	2	62	69	66	5
17	Милутин Бојић	2	64	111	88	33
18	Мирослав Антић	1	71	71	71	
19	Младен Стојановић	1	549	549	549	
20	Петар П. Његош	2	106	130	118	17
21	Петар Кочић	1	38	38	38	
22	Станко Ракита	2	64	102	83	27
23	Свети Сава	1	101	101	101	
24	Војислав Илић	2	63	67	65	3
25	Вук Караџић	2	125	126	126	1
У		44	36	549	128	111

Због нехомогености резулата груписаних по школама (резулат Bartlett's теста:  $p < 0,05$ ), примењена је непараметарска анализа. Примењујући Kruskal-Wallis тест нашло се да постоји статистички значајна разлика у концентрацијама радона у различитим школама (KW,  $p = 0,046$ ), а и непараметриска анализа је дала исти резултат.

Концентрација радона у школи Младен Стојановић, Бранислав Нушић и Бранко Радичевић су значајно веће у поређењу са другим школама (MW,  $p = 0,001$ ). Док су ниже концентрације радона у односу на остале школе идентификоване у школама; Јован Дучић, Змај. Ј. Јовановић, Петар Кочић (MW,  $p = 0,0001$ ). Постоји више фактора који утичу на ове разлике у концентрацијама, а који су повезани са локалном геологијом тла и

карактеристикама самог објекта. У том правцу даља анализа је спроведена да би се испитала концентрација радона у зависности од спрата и типа просторије где су мерења вршена.

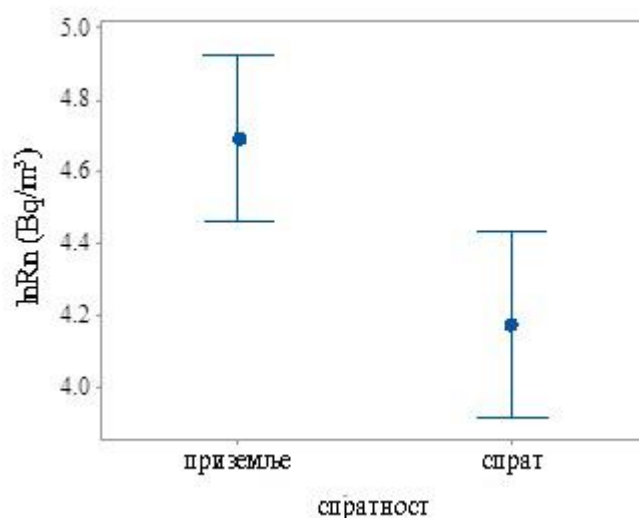
Дескриптивна статистика концентрације радона мерене у приземљу и на првом спрату у школама Бања Луке је представљена у Табели 12.

Табела 12. Дескриптивна статистика концентрације радона (спратност)

	CRn (Bq/m <sup>3</sup> ) приземље	CRn (Bq/m <sup>3</sup> ) спрат
Број мерења	37	7
Минимум	36	38
Медијана	101	71
Максимум	549	102
Аритметичка средња вредност	139	68
Стандардна девијација	117	21
Геометријска средња вредност	108	65
Геометријска стандардна девијација	1.51	1.15

Анализа овако груписаних података показала је да се концентрација радона статистички значајно не разликује у просторијама у приземљу од просторија на првом спрату ( $B$ ,  $p=0,026$  MW,  $p=0,032$ ). Ефекат може да се види на слици 28., концентрација радона се статистички значајно разликују јер им се преклапају интервали поверења (на 95%) њихових средњих вредности. Резултати су очекивани и сагласни са резултатима добијеним од стране већег броја аутора, као на пример: [Venoso et al, 2009; Papaefthymiou & Georgiou, 2007; Malanca, et al, 1998].





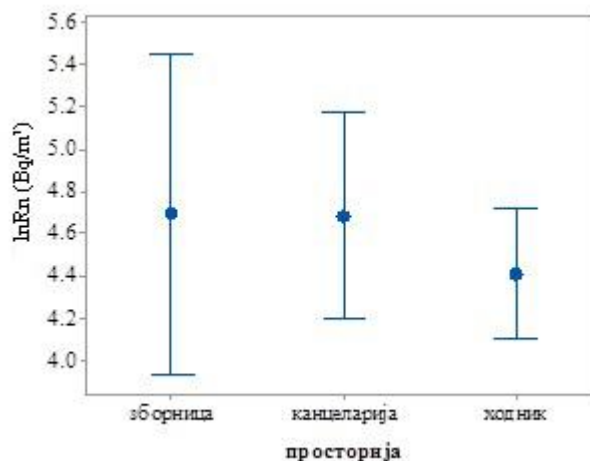
Слика 28. Средње вредности (са 95% интервалом поверења) концентрације радона мерене у 44 просторије 25 школа Бања Луке

Просторије у којима је вршено мерење концентрација радона, су подељене у четири групе сходно њиховим наменама. Дескриптивна статистика је приказана у Табели 13 се односи само на три групе, четврта (учионица) није укључена јер је направљено само једно мерење што представља недостатак за комплетнију анализу.

Табела 13. Дескриптивна статистика (просторије)

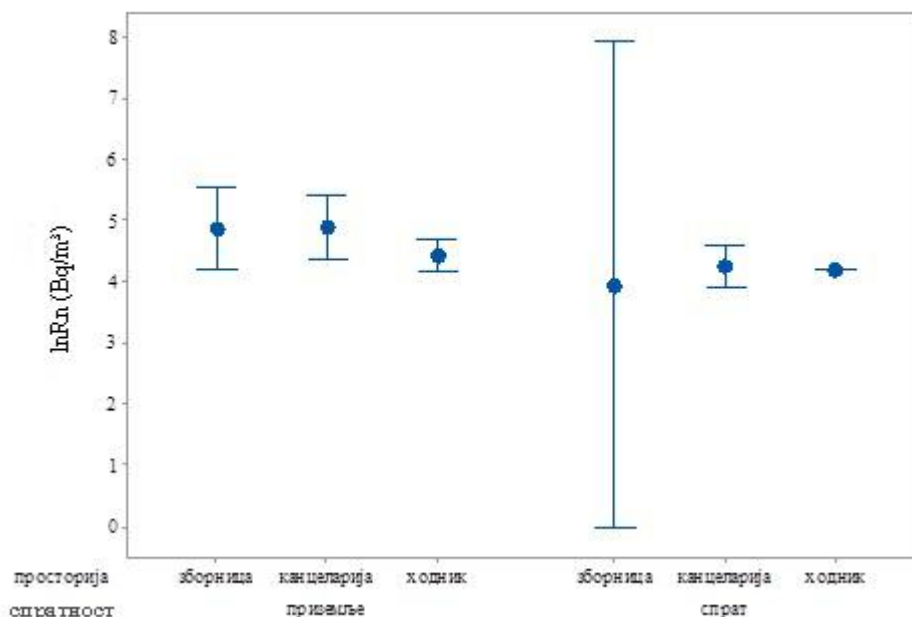
	$C_{Rn}$ (Bq/m³) зборница	$C_{Rn}$ (Bq/m³) Канцеларија	$C_{Rn}$ (Bq/m³) ходник
Број мерења	10	15	18
Минимум	38	36	48
Медијана	88	103	74
Максимум	549	374	314
Аритметичка средња вредност	156	137	94
Стандардна девијација	109	108	82
Геометриска средња вредност	163	107	63
Геометриска стандардна девијација	2.27	2.00	1.63

Анализа резултата је показала да се и овако груписане концентрације радона статистички значајно не разликују (В,  $p=0,184$  LSD: зборница-ходник ( $p=0,279$ ); зборница-канцеларија( $p=0,977$ ), ходник-канцеларија ( $p=0,235$ )(Слика 29).



Слика 29. Средње вредности  $\ln$  трансформисане концентрације радона у различитим просторијама

Очекиване су ниже вредности концентрације радона у ходницима у односу на друге две просторије. Разлог за то је различит режим измене ваздуха у зависности од употребе. На пример, вентилација у ходницима је већа у односу на вентилацију у зборницама или канцеларијама. У овом раду то није потврђено. Такође, када је направљена анализа концентрација радона у просторијама по спратовима разлика није постојала (Слика 30).



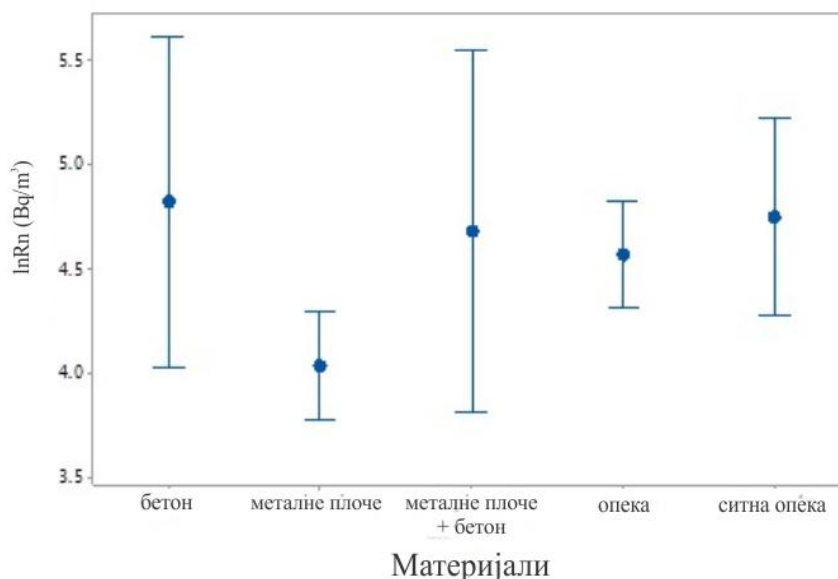
Слика 30. Средње вредности  $\ln$  трансформисане концентрације радона у различитим просторијама на различитим спратовима

Дескриптивна статистика концентрација радона измерених у школама у зависности од врсте грађевинског материјала од којег су школе саграђене приказана је у Табели 14.

Табела 14. Дескриптивна статистика (грађевински материјал)

	бетон	металне плоче	металне плоче+ бетон	опека	ситна опека
Број мерења	8	4	6	22	4
Минимум	36	48	62	47	75
Медијана	118	57	85	82	130
Максимум	374	67	549	327	142
АМ	177	57	158	116	119
СД	142	9	192	85	31
ГМ	124	56	108	97	115
ГСД	2.47	1.03	1.99	1.40	1.09

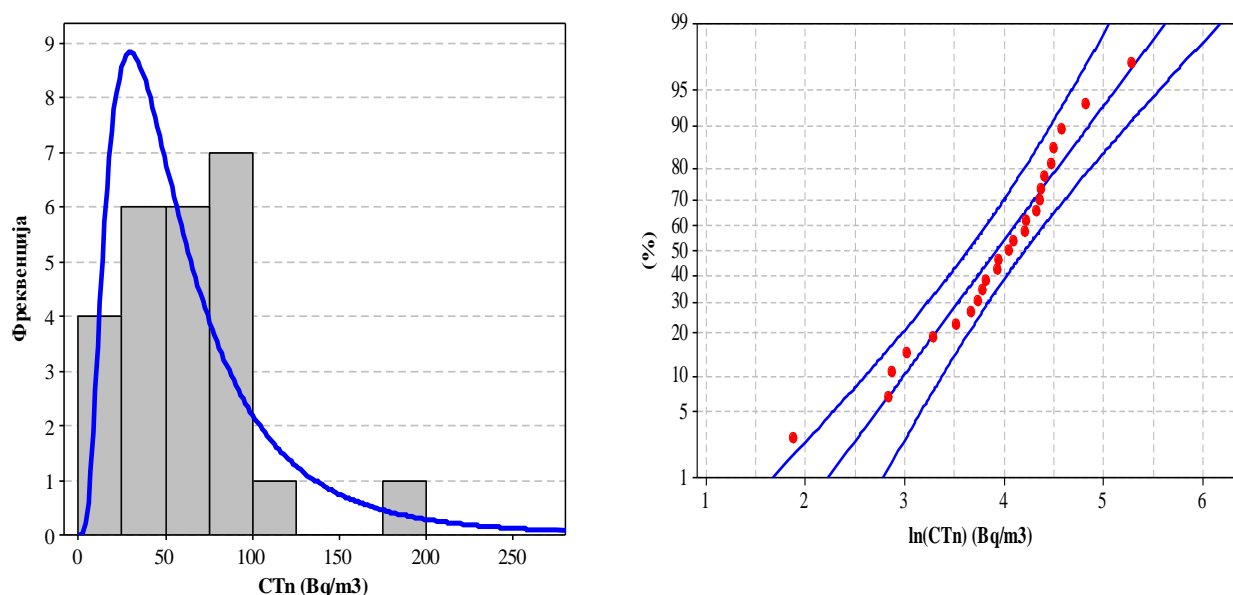
Анализа резултата је показала да постоје разлике измедју објеката грађених од различитих грађевинских материјала ( $B, p=0,031$ ). Измерене су ниже вредности концентрације радона у објектима направљених од металних панела у односу на објекте направљене од ситене опеке и опеке ( $MW, p=0,022$ ) канцаларија ( $p=0,235$ )(Слика 31).



Слика 31. Средње вредности  $\ln$  трансформисане концентрације радона у зависности од грађевинског материјала

### 5.1.2. Концентрација торона у школама

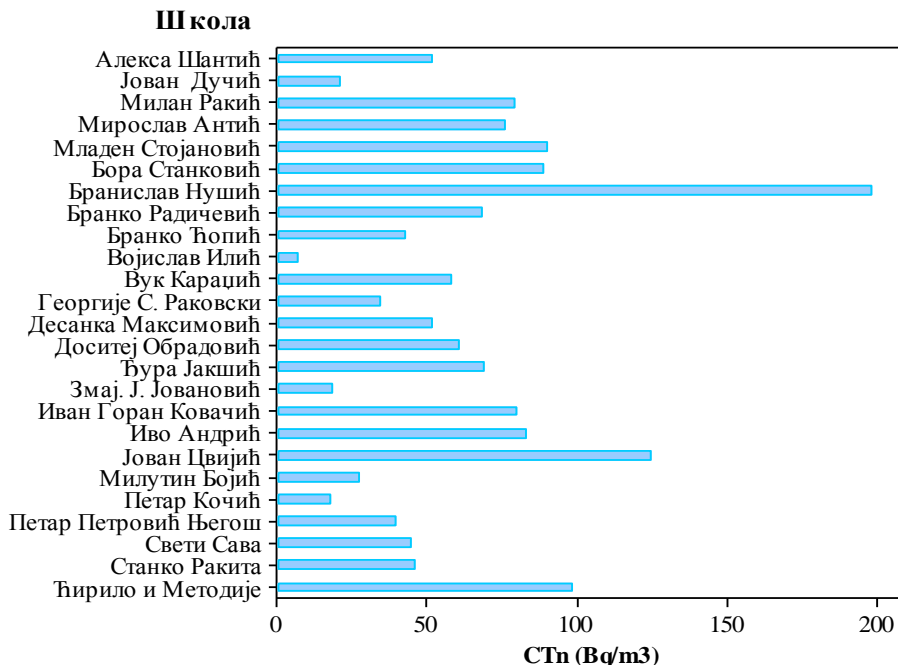
Хистограми резултата измерене концентрације торона у школама фитовани са лог-нормалном функцијом и  $\ln$ -трансформисаних података фитовани нормалном функцијом су приказани на слици 32.



Слика 32. Хистограм измерене концентрације торона фитован лог-нормалном функцијом и  $p$ - $p$  график  $\ln$  трансформисане концентрације торона фитован нормалном дистрибуцијом.

На хистограму (Слика 32) се види да су у 25 случајева измерене концентрације торона биле мање од  $200 \text{ Bq/m}^3$ , са највећом фреквенцијом до  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

На слици 33. су приказане измерене концентрације торона у школама појединачно. Највећа концентрација измерена је у школи Бранислав Нушић, како је извршено по једно мерење у свакој школи, није могла да се направи статистичка анализа торона



Слика 33. Измерена концентрација торона у школама

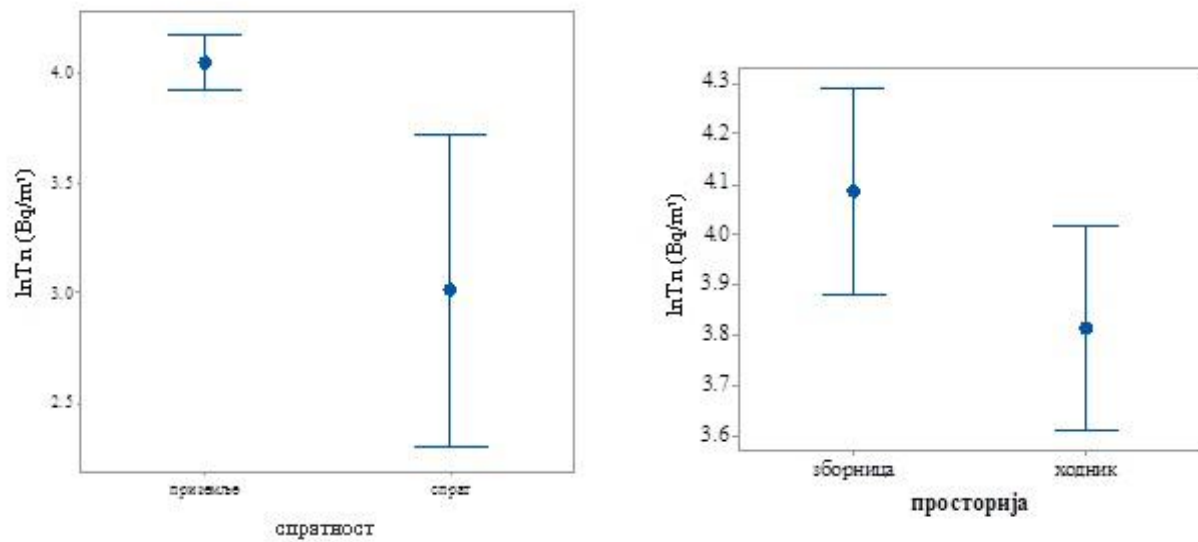
Са слике 33. се види да су концентрације торона прилично високе и захтевају додатну анализу. За очекивати је да торон износи 5 до 10 % од вредности радона али у овом рад то није случај. Највиша вредност је измерена у школи Бранислав Нушић која се налази на удаљености 100 m од извора геотермалне бање. Анализирајући резултата у другим школама видимо да су вредности торона повишене што наводи на закључак да торон потиче од грађевинског материјала изграђених објеката. Битно је напоменути да је већина објеката прилично стара и да су се детектори током мерења били причвршћени уз сами зид.

Дескриптивна статистика концентрације торона груписана по спратовима, просторијама и грађевинским материјалима је приказана у Табели 15.

Табела 15. Дескриптивна статистика концентрација торона (спратност, намена просторије и врста грађевинског материјала)

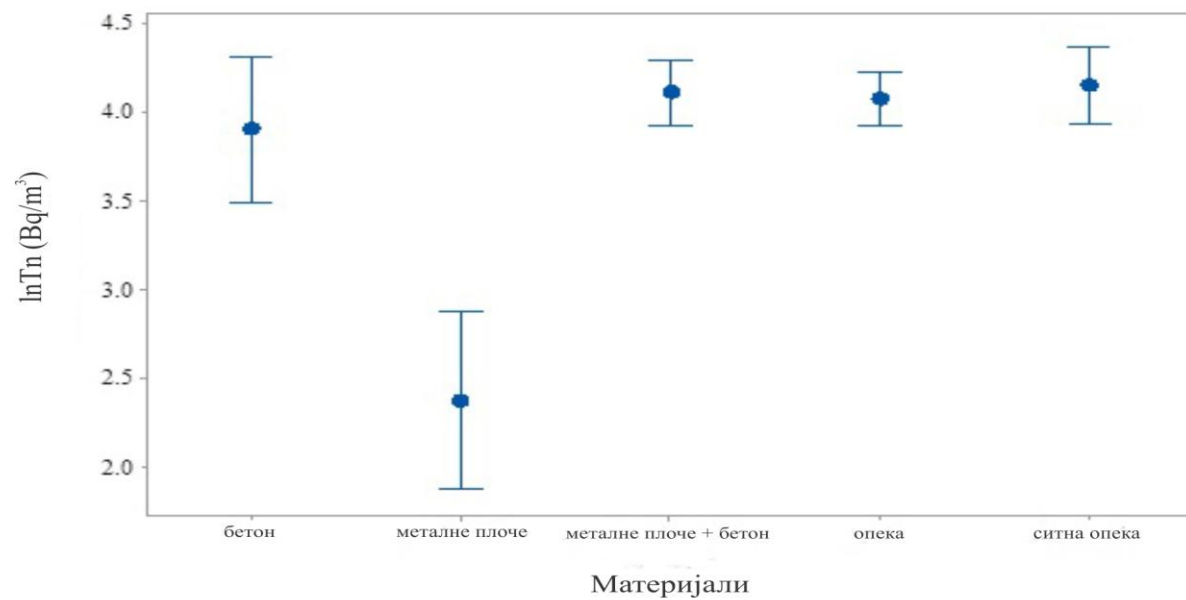
	Тп укупно	призе мље	спр ат	збо рни ца	ходник	бетон	металне плоче	металне плоче +бетон	Тп - опека	ситна опека
Број мерења	25	22	3	10	15	5	2	4	12	2
Минимум	7	18	7	17	7	17	7	44	20	51
Медијана	57	59	17	59	51	39	12	62	64	65
Максимум	198	198	76	198	124	198	18	90	124	79
АМ	63	67	33	72	57	71	12	65	66	65
СД	40	40	37	50	33	73	8	23	30	20
ГМ	51	57	20	60	45	50	11	61	59	64
			3.4	1.9						
ГСД	2.07	1.77	3	0	2.19	2.49	2.02	1.44	1.69	1.36

Тестирања хомогености варијансе је потврдила хомогену расподелу резултата за спратове (В,  $p=0,095$ ) за просторије (В,  $p=0,531$ ) и за грађевинске материјале (В,  $p=0,512$ ). Примењена је параметриска анализа да би се тестирала зависност концентрације торона у школама од спрата, типа просторије и грађевинског материјала. Анализа је показала да постоји утицај тих фактора (АНОВА,  $p=0,030$ ). Постоји разлика између мерених концентрацијама торона у приземљу и на првом спрату (LSD,  $p=0,01$ ) (Слика 34, лево). Разлика између концентрација торона у различитим просторијама (LSD,  $p=0,274$ ) није изражена (Слика 34, десно). Ово указује да је извор торона у школама грађевински материјал.



Слика 34. Средње вредности  $\ln$  трансформисане концентрације торона са у различитим просторијама на различитим спратовима.

Разлика концентрација торона у зависности од врсте грађевинског материјала приказана је на слици 35. Најмање вредности торона су измерене у школама где је уградбени материјал био металне плоче.



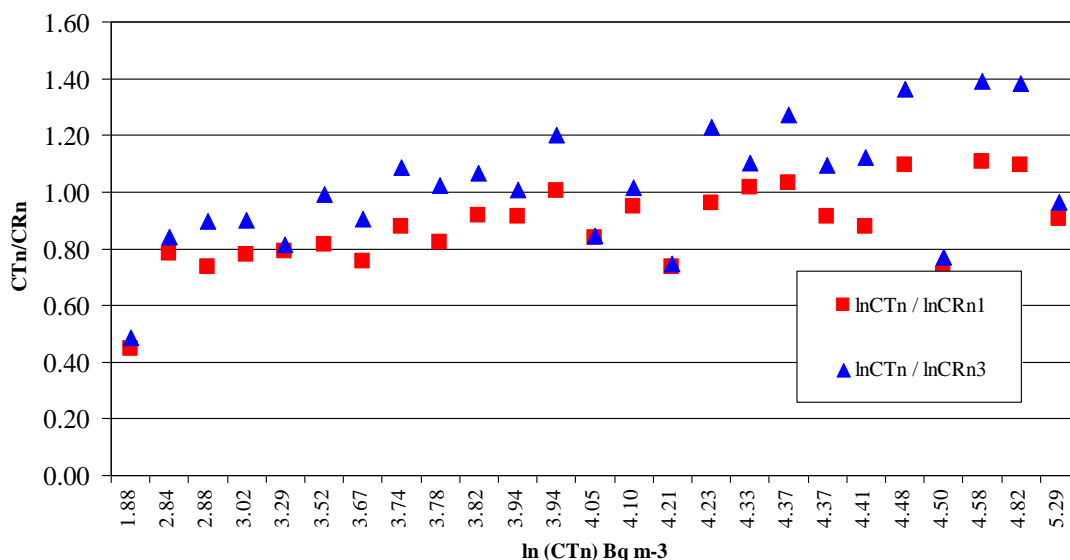
Слика 35. Средње вредности  $\ln$  трансформисане концентрације торона у зависности од врсте грађевинског материјала

#### 5.1.2.1. Однос концентрације торона и радона

Општи утицај концентрација торона на резултате мерења концентрација радона је мали ради његовог кратког периода полураспада. Ипак, у случајевима када је концентрација торона пуно већа у односу на концентрацију радона, не треба занемарити његов утицај. На пример, у својим истраживањима [Tokonami et al. 2001 i Sugino et al. 2005], су показали да када је однос концентрације торона и радона ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) већи од један, концентрација радона је прецењена за 4%. Ако је однос приближно једнак 100, онда се очекује модификација резултата радона за фактор 10, уколико се не користе дискриминативни детектори. Из ових истраживања се види да се утицај торона на радон не очекује када је однос ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) мањи од 0,8.

У овом истраживању одређени је однос торона и радона за концентрације радона мерене са првим (гама 1) детектором и трећим (радует) детектором. Ова два детектора су узета на разматрање из разлога што су у највећем броју мерења били експонирани у исто време. Резултат односа су приказани на слици 36. Однос концентрације торона и радона ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) у школама Бања Луке је у интервалу од 0,121 до 2,083; исто тако има лог-нормалну дистрибуцију. Аритметичка средња вредност односа:  $C_{Tn}/C_{Rn}$  је једнака на 0,821 ( $SD=0,521$ ), а геометријска средња вредност: 0,663 ( $ГСД=2,032$ ). Анализи кумулативне фреквенције резултата је показала да у 11 случајева однос ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) већи од 0,8.





Слика 36. Однос  $\ln$  концентрације торона и радона у школама

У Табели 16 су наведене вредности истраживања у Словенији и упоређене са истраживањем спроведеним у Бања Луци. Битно је напоменути да су за мерење у сва три случаја кориштени и анализирани исти типови детектора а и позиција детектора су биле скоро идентиче. Због ових чињеница разматрање односа радона и торона на поменутим локацијама имају смисла.

Табела 16. Резултати мерења: концентрације торана и  $C_{Tn}/C_{Rn}$  из истраживања у Словенији објављени у међународним часописима.

	$C_{Tn}$ (Bq/m <sup>3</sup> ) интервал	$C_{Tn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Зид/под растојање (m)	$C_{Tn}/C_{Rn}$	
		аритметичка (геометријска) средња вредност			
Словенија (35 основне школе);	21-368	87 (-)	1m/1,5m	0,38	Vaupotič and Kavasi, 2010
Словенија (18 основних школа)	21-73		1m/1,5m	0,02-0,83	Vaupotič et al., 2012
Република Српска (25 школа)	7-198	63(51)	1m/1,8m	0,121 - 2,083	Овај рад

Из табеле се види да је однос концентрације торона и радона израженији у школама Бања Луке него у школама Словеније, разлог за то су веће концентрације торона.

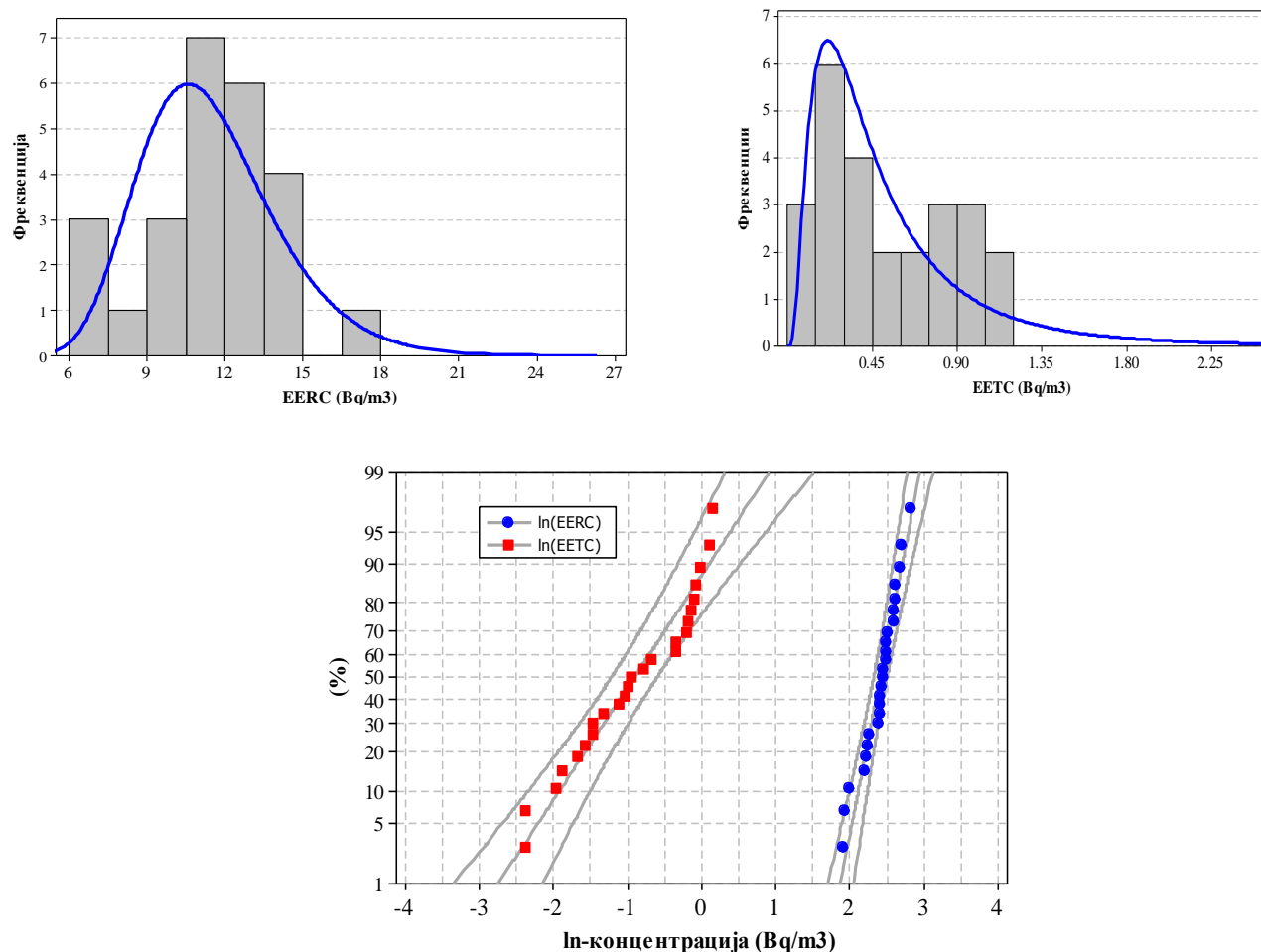
### **5.1.3. Равнотежна еквивалентна концентрација радона и торона у школама Бања Луке (*EERC* и *EETC*)**

Како последица радиоактивног распада радона и торона присутног у затвореном простору, јављају се њихови краткоживећи потомци распада. Концентрација потомака се изражава како равнотежна еквивалентна концентрација *EEC* односно *EERC* (равнотежна еквивалентна концентрација радона) и *EETC* (равнотежна еквивалентна концентрација торона), а њихове вредности се одређују једначинама:

$$EERC = 0,105 \cdot C_{218\text{Po}} + 0,515 \cdot C_{214\text{Pb}} + 0,380 \cdot C_{214\text{Bi}} \quad (5.2)$$

$$EETC = 0,913 \cdot C_{212\text{Pb}} + 0,087 \cdot C_{212\text{Bi}} \quad (5.3)$$

Дескриптивна статистика измерених вредности *EERC* и *EETC* је приказана у Табели 6. Интервали измерених вредности су: 6,79-16,84 Bq/m<sup>3</sup> за *EERC* и 0,09-1,16 Bq/m<sup>3</sup> за *EETC*. Лог-нормална расподела је потврђена у обе групе резулата (KS,  $p=0,315$  за *EERC* и  $p=0,542$  за *EETC*). На слици 37. су приказани хистограми *EERC* и *EETC* фитован лог-нормалном функцијом и график  $\ln$  трансформисане *EERC* и *EETC* фитован нормалном дистрибуцијом.



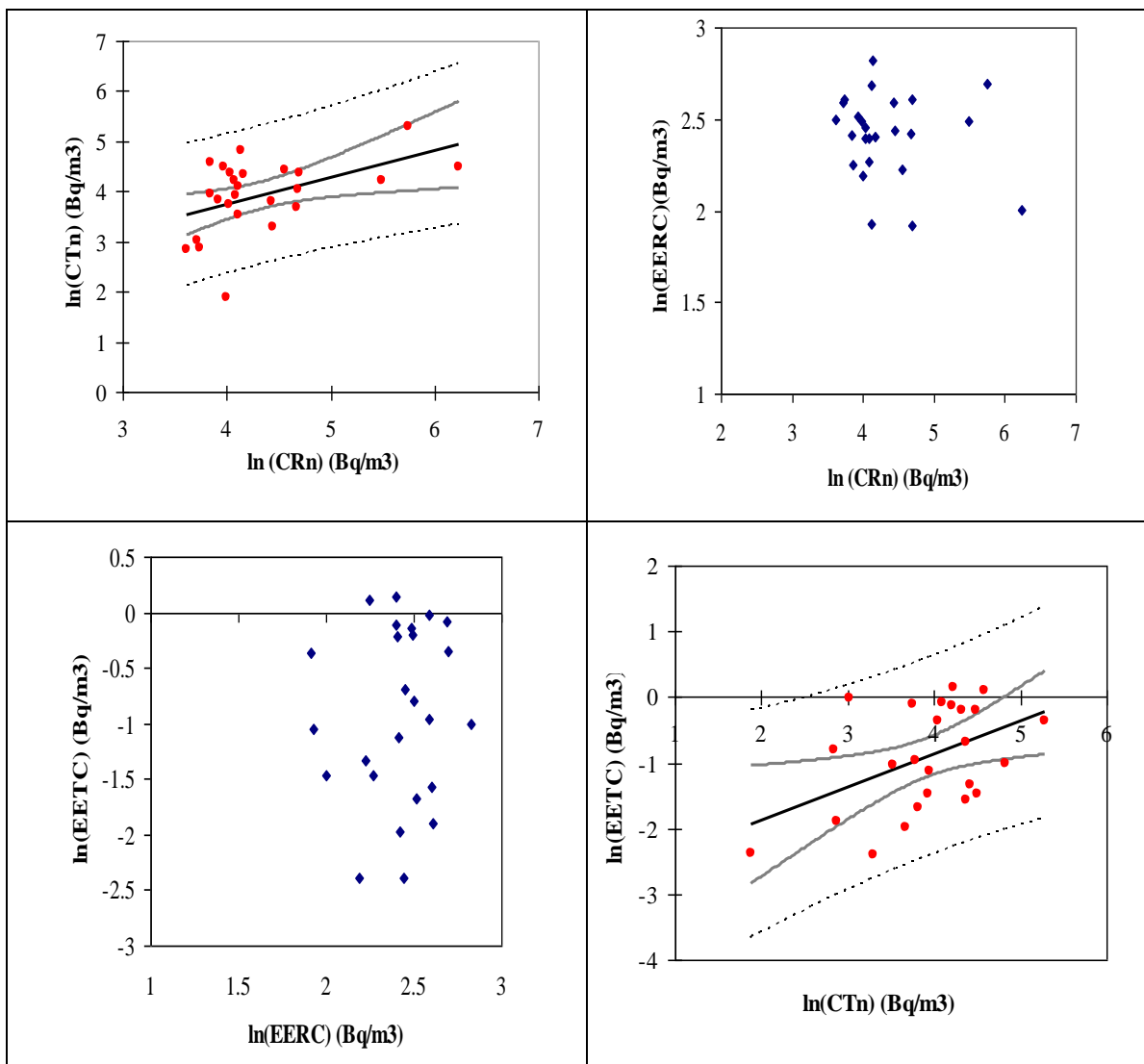
Слика 37. Хистограми  $EERC$  и  $EETC$  фитован лог-нормалном функцијом и график  $\ln$  трансформисане  $EERC$  и  $EETC$  фитован нормалном дистрибуцијом.

Однос између  $EETC$  и  $EERC$ : ( $EETC/ EERC$ ) је израчунат и добијене вредности су у интервалу од 0,008 до 0,118 са геометријском средњом вредности од 0,036 (ГСД-2,22).

Број истраживања и објављених радова посебно за  $EETC$  је још увек ограничен да би се направила нека генерализација вредности  $EETC/ EERC$  на глобалном нивоу. На пример, у извештају [UNSCEAR, 2006] прихвата се модел предложен од ICRP да је на основу физичких карактеристика уласка радона и торона у грађевинске објекте брзина измене ваздуха (вентилација)  $0,7 \text{ h}^{-1}$ . На основу тог модела очекиване концентрације produkта распада производа у затвореним објектима су: за радон:  $EERC=15 \text{ Bq/m}^3$  ( $2\text{-}50 \text{ Bq/m}^3$ ) за торон:  $EETC=0,5 \text{ Bq/m}^3$  ( $0,04 \text{ - } 2 \text{ Bq/m}^3$ ), одакле произлази да је  $EETC/ EERC=0,03$ .

#### 5.1.4. Корелације концентрација у школама

На слици 38. графички може да се види како измерене и  $\ln$  трансформисане концентрације међусебно зависе. Визуелно и преко линерне регресије је потврђена корелација између концентрација торона и радона (Слика 38 горе лево) и између концентрација торона и  $EETC$  (Слика 38 доле десно).



Слика 38. У случају значајне статистичке корелације, веза међу величинама је моделирана линеарном функцијом (црна пуна линија). На истом графику пуна сива линија представља 95% интенитервал поверења средње вредности, а испрекидана црна линија означава 95% интенитервал поверења модела.

Параметри линеарне регресије и корелације између концентрације радона, торона и њихових продуката распада су приказани у Табели 17. За квантификацију корелације кориштени су Пирсонов и Спирманов коефицијент и њихова вредност на квадрат као коефицијент детерминације.

Табела 17. Параметри линеарне регресије и корелације између концентрације радона, торона и њихових продукти распада.

	$p$	Линерни модел : $y=ax+b$		$R$ $R^2$
		$a$	$b$	
$\ln(\text{CRn1}) - \ln(\text{CTn})$	0.008	$0,457 \pm 0,158$	$2,715 \pm 0,630$	0,51 026
$\ln(\text{CRn2}) - \ln(\text{CTn})$	0.005	$2,640 \pm 0,517$	$0,401 \pm 0,130$	0,550 0,303
$\ln(\text{CRn3}) - \ln(\text{CTn})$	0.091			
$\ln(\text{EERC}) - \ln(\text{EETC})$	0.605			
$\ln(\text{EERC}) - \ln(\text{CRn1})$	0.352			
$\ln(\text{EERC}) - \ln(\text{CRn2})$	0.300			
$\ln(\text{EERC}) - \ln(\text{CRn3})$	0.296			
$\ln(\text{EETC}) - \ln(\text{CTn})$	<b><math>p=0.020</math></b>	$2,883 \pm 0,799$	$0,501 \pm 0,201$	0,462 0,213

\*у случају значајности корелације вероватноћа грешке  $p < 0.05$

Из табеле 17 се види да и у случају концентрације торона и *EETC*, корелација је слабија у односу на корелације радона и торона. Ово није неочекивано самим тим што различити фактори утичу на концентрацију гаса радона и торона, а различити за њихове продукте распада. На пример, генерисање радона и торона зависи од концентрација радијума и торијума у извору (тло, грађевински материјали). Концентрација радона ради његовог довољно дугог периода полураспада је хомогено распоређена у затвореном простору док се смањује са повећањем растојања до извора (зида, плафона..). Концентрација распаднутих потомака зависи од концентрације радона и торона, а на њихову концентрацију утичу и допунски фактори како што су концентрација аеросола у затвореној просторији и брзина измене ваздуха на коју су осетљивији у односу на сам гас.

На концентрацију распадних прозвода торона брзина измене ваздуха утиче мање него на концентрацију продукта распада радона [Qiuji, 2005].

## 5.2. Концентрација радона, торона и њихових краткоживећих потомака у кућама Бања Луке

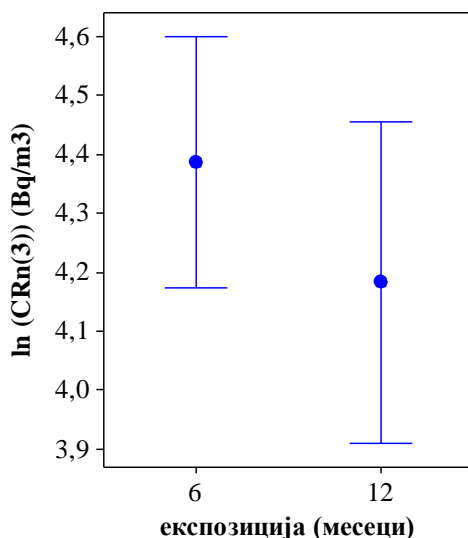
Дескриптивна статистика свих измерених резултата у кућама Бања Луке је приказана у Табели 18.

Табела 18. Дескриптивна статистика радона и торона (куће)

	$C_{Rn}(3)$	$C_{Rn}(4)$	$C_{Rn}(av)$	$C_{Tn}$	$EERC$	$EETC$
Број мерења	81	19	81	19	37	36
Минимум	23	12	22	2	6,34	0,10
Медијана	62	45	62	29	9,46	0,38
Максимум	1773	201	1773	77	14,41	1,10
Аритметичка средња вредност	112	65	110	34	9,49	0,44
Стандардна девијација	205	52	205	22	1,98	0,28
Стандардна грешка	23	12	23	5	0,33	0,05
Геометриска средња вредност	73	46	71	26	9,29	0,36
Геометриска стандардна девијација	2,14	2,41	2,18	2,51	1,23	1,97
Вероватноћа грешке да резултати имају лог нормалну дистрибуцију (KS тест)– ефекат је значајан када $p > 0.05$	0,344	0,807	0,554	0,569	0,921	0,948

Концентрације радона измерене детектором број 2 (CRn (2)) у 81 кући налазе се у интервалу од 23 до 1773 Bq/m<sup>3</sup>. Како што је раније наведено мерена концентрација радона овим детекторима извршена је у различитим временима експозиције. Наиме у 8 кућа детектори су били експонирани 12 месеци, у 28 и 4 експозиција је трајала 13 и 14 месеци респективно . У 41 кући експозиција је трајала мање од годину дана и то: 3 месеца у 1, 6 месеци у 27 кућа, 7 месеци у 12 а 8 у једној кући. Резултати просечних концентрације груписаних по времену експозици су приказани на слици 39. Како што се види са слике средње вредности овако груписаних резултата одступају једни од других. Обе групе резултата су имале лог-нормалну дистрибуцију. После нормализаједно са 95% интервалом

поверења. Може се приметити да је вредност за 14 месеци нешто нижа од осталих али разлика није значајна.



Слика 39. Средње  $\ln$  трансформисане концентрације радона  $C_{Rn}(3)$  у зависности од времена експозиције.

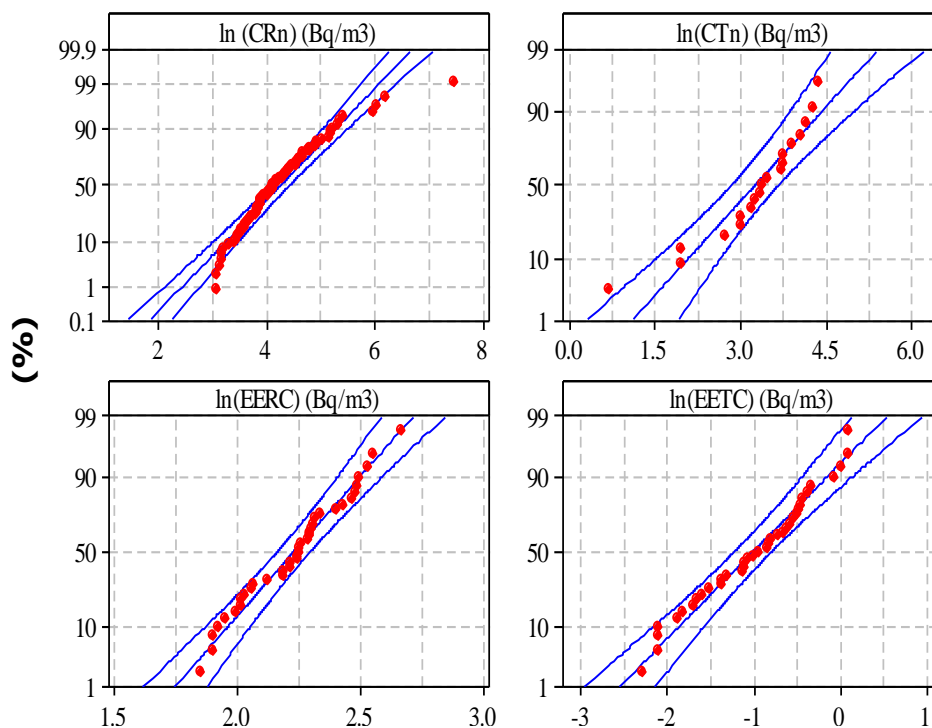
После теста хомогености ( $B$ ,  $p=0,079$ ), направљено је тестирање значајности разлике међу групама. Примењујући параметриски АНОВА и непараметриски Kruskal-Wallis се показало да не постоји статистички значајна разлика међу резултатима концентрација радона експонираних у различитим месецима ANOVA,  $p=0,198$ , KW, 0,077. Из тог разлога обе групе резулата су анализирани као једна.

Да би се проверила репродуцибилност резулата, исто како што је урађено за школе, у 19 кућа (по случајном избору) су постављени и детектори број 3 ( $C_{Rn}(3)$ ). Интервал резулата мерених са детектором бр 3 је од 12 до 201 Bq/m<sup>3</sup>. У тим кућама концентрација радона је процењена као средња вредност резулата измерених са оба детектора. Усредњене концентрације и концентрације радона мерене у кућама само са једним детектором (број 3) су означене са  $C_{Rn}(av)$  у Табели 18.

Концентрације радона  $C_{Rn}(av)$  у свих 81 кући су биле у интервалу од 22 до 1773 Bq/m<sup>3</sup>. Концентрација радона у 74 куће била је мања од 200 Bq/m<sup>3</sup>. Концентрације радона веће од 400 Bq/m<sup>3</sup> су измерене у 3 куће. Због једноставности у даљем тексту  $C_{Rn}(av)$  ће се претстављати само са  $C_{Rn}$ .

### 5.2.1. Корелације концентрација радона у кућама

У Табели 19. су наведени и резултати тестирања и потврде лог-нормалне дистрибуције. Поново је урађена  $\ln$  трансформација резулата у циљу нормализације за даља статистичка испитивања. На слици 40. су приказани p-p графици  $\ln$  трансформисане концентрације радона, торона и њихових краткоживећих потомака фитовани нормалном функцијом:



Слика 38. Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона (са 95% границама значајности)

Даља анализа резултата укључује испитивање корелација међу измереним вредностима: концентрације радона, торона и EERC, EETC. Резултати линеарне регресионе анализе су приказане у Табели 19. и види се да у резултатима за куће постоји слаба корелација између концентрација торона и његових продуката распада, а све друге су статистички незначајне. Из разлога што иста таква корелација је била статистички значајна и у школама где се торон мерио ближе зиду у односу на куће указује на могућност да је корелација у нашем случају независна од растојања. Из разлога што је у оба случаја та слаба указује да различити фактори утичу на концентрација торона и његових продуката распада. Не постојање корелације измедју радона и торона (за



концентрације радона мерене са оба детектора а и за средњу вредност) указује да утицај торона на измерене концентрације радона није значајан и да су концентрације независне једне од других.

Табела 19. Параметри линеарне регресије и корелације између концентрација радона, торона и њихових продуката распада у кућама

y-x	p	Линерни модел : $y=ax+b$		R R <sup>2</sup>
		A	b	
ln(CRn2)- ln(CTn)	p=0.274			
ln(CRn3)- ln(CTn)	p=0.325			
ln(CRn)- ln(CTn)	p=0,295			
ln(EERC)- ln(EETC)	p=971			
ln(EERC)- ln(CRn2)	p=0,591			
ln(EERC)- ln(CRn3)	p=0,366			
ln(EERC)- ln(CRn)	p=0,541			
ln(EETC)- ln(CTn)	<b>p=0.010</b>	0,462±0,157	-2,517±0,520	0.605 0.366

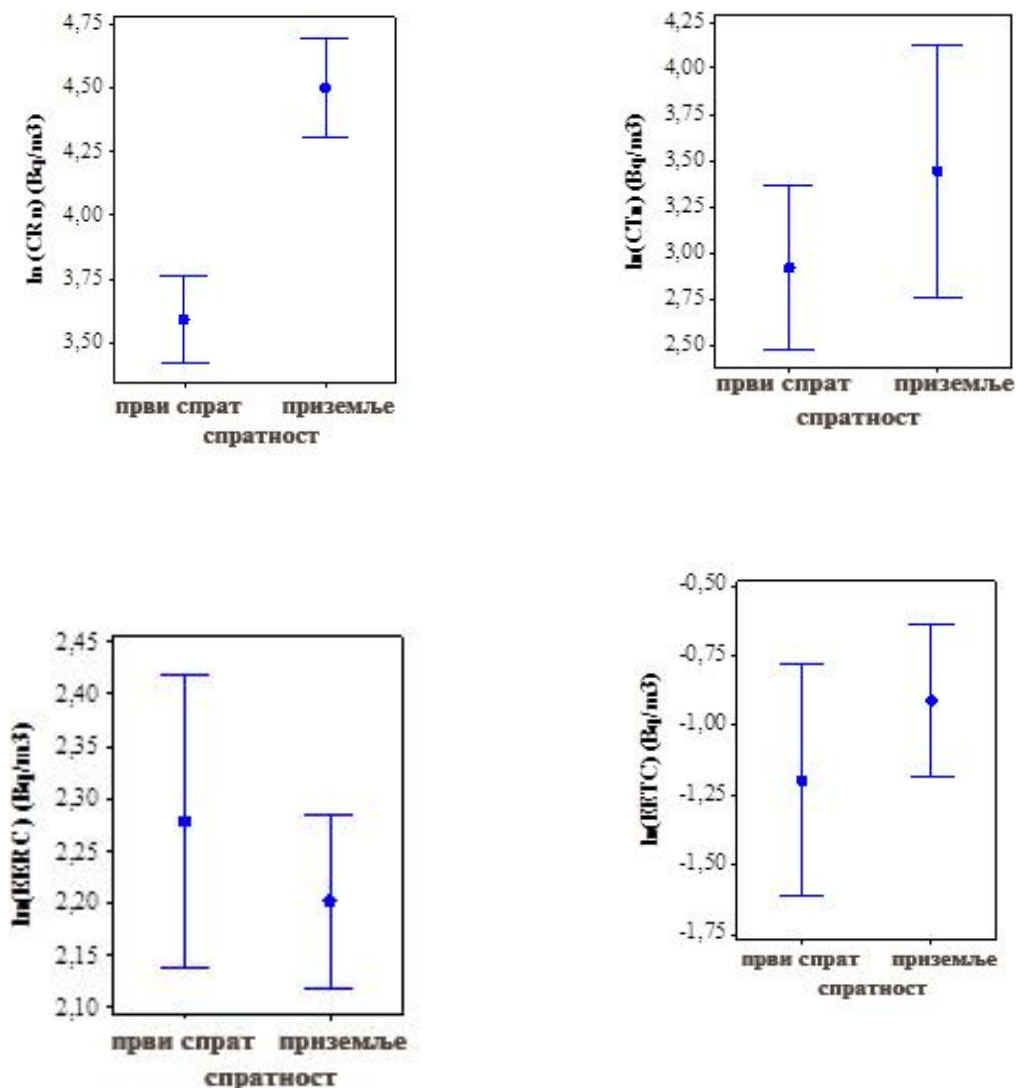
Корелација између радона и торона је испитивана и од стране других аутора где су углавном добијани слични резултати: не постоји корелација као што је и у овом раду случај са кућама, а ако постоји она је јако слаба (Табела 19). То нам указује да су концентрације независне и не могу да се процене једнаиз друге. На пример, [Kovač et.al., 2010], је испитивао корелације између радона и торона у кућама и различитим радним срединама, које је класификовао у 9 група. Корелација је постојала само у 4 случаја са коефицијентима корелације у интервалу од 0,112-0,304. Изистраживања на Косову, [Gulan et al., 2012] позитивна значајна корелација је добијена између EETC и EERC и између EERC и радона са Пирсоновим коефицијентима детрминације 0,59 и 0,013. Постојање слабе корелације између EETC и концентрације торона у школама и у кућама је у сугласности са другим истраживањима. На пример, из мерења у 450 кућа у Кореји, добијена је исто тако слаба корелација са коефицијентом корелације од 0,05. [Kim et al., 2007]. Процеси који контролишу концентрацију продуката распада торона независни су од стварања торона [Gulan et al., 2012]. У анализи корелација концентрације радона, торона и продуката распада торона базираној на 6 истраживања спроведених у 3 земље (Кина,

Ирска и Кореја), [Janik et.al., 2013] су закључили да су концентрације независне једне од других.

### **5.2.2. Утицај спрата на мерене концентрације радона, торона и продуката распада**

Даља анализа се састоји у испитивању утицаја спратности на мерене концентрације. Хомогеност варијансе груписаних по спратовима није потврђена за концентрацију радона ( $B$ ,  $p=0,001$ ), а потврђена је за концентрацију торона ( $B$ ,  $p=0,2$ ),  $EERC$  ( $B$ ,  $p=0,322$ ) и за  $EETC$  ( $B$ ,  $p=0,689$ ). После чега су примењени параметриски: АНОВА и непараметриски Kruskal-Wallis (KW) тест да би се утврдила разлика међу њиховим средњим вредностима.

Концентрације радона измерене у приземљу статистички значајно су више у односу на први спрат (АНОВА,  $p < 0.0001$  и KW,  $p < 0.0001$ ) што се јасно види и на слици (лево горе). На слици 41. су представљене средње вредности  $\ln$  трансформисане концентрације торона заједно са 95% интервалом поверења груписаних по спратовима и та разлика није уочљива. Резултати KW теста су показали да не постоји статистички значајна разлика у концентрацијама по спратовима (АНОВА,  $p=0,243$ ; KW,  $p=0,098$ ). Утицај спрата на концентрације продуката распада радона  $EERC$  и торона  $EETC$  исто тако статистички није значајна, ( $EERC$ : АНОВА,  $p=0,297$  и  $EETC$ : АНОВА,  $p=0,222$ )



Слика 41. Средње измерене концентрације радона и торона и њихових распадних производа мерене на различитим спратовима у кућама и школама

### 5.3. Концентрација радона, торона и њихових краткоживећих потомака у школама и кућама града Бања Луке

Када су обрађени резултат мерења за школе и куће посебно идеја је да се упореде резултати мерења али да се и резултати посматрају заједно како би се анализирала сва мерења и добили подаци за третирано подручје.

Дескриптивна статистика резулата мерења концентрација радона, торона и њихових продуката распада у школама и кућама града Бања Луке је приказана у Табели 20.

Табела 20. Дескриптивна статистика радона и торона у школама и кућама

	CRn	CTn	EERC	EETC
Број објеката	125	44	62	61
Мин	22	2	6,34	0,091
Мед	62	43	9,97	0,383
Мах	1773	198	16,84	1,155
АС	111	50	10,27	0,475
СД	174	36	2,37	0,308
ГС	76	38	10,00	0,376
ГСД	2,11	2,39	1,26	2,054

Као модел за дистрибуцију резулата је одабрана лог-нормална функција чији параметри су дати у Табели 21 (колоне: 2-5). Даље тестирање хипотезе да не постоји значајна разлика између мерених и емпиријских вредности (добивене из фитоване функције) је урађен са Колмогоров-Смирнов тестом на нивоу поверења 95%. Кад су резулатати нормализовани  $\ln$  трансформацијом, фитовани нормалном функцијом вероватноћа грешке одабраног модела је за све групе резултата била већа од 0,05 (што значи да је потврђена хипотеза нормалне дистрибуције резултата)

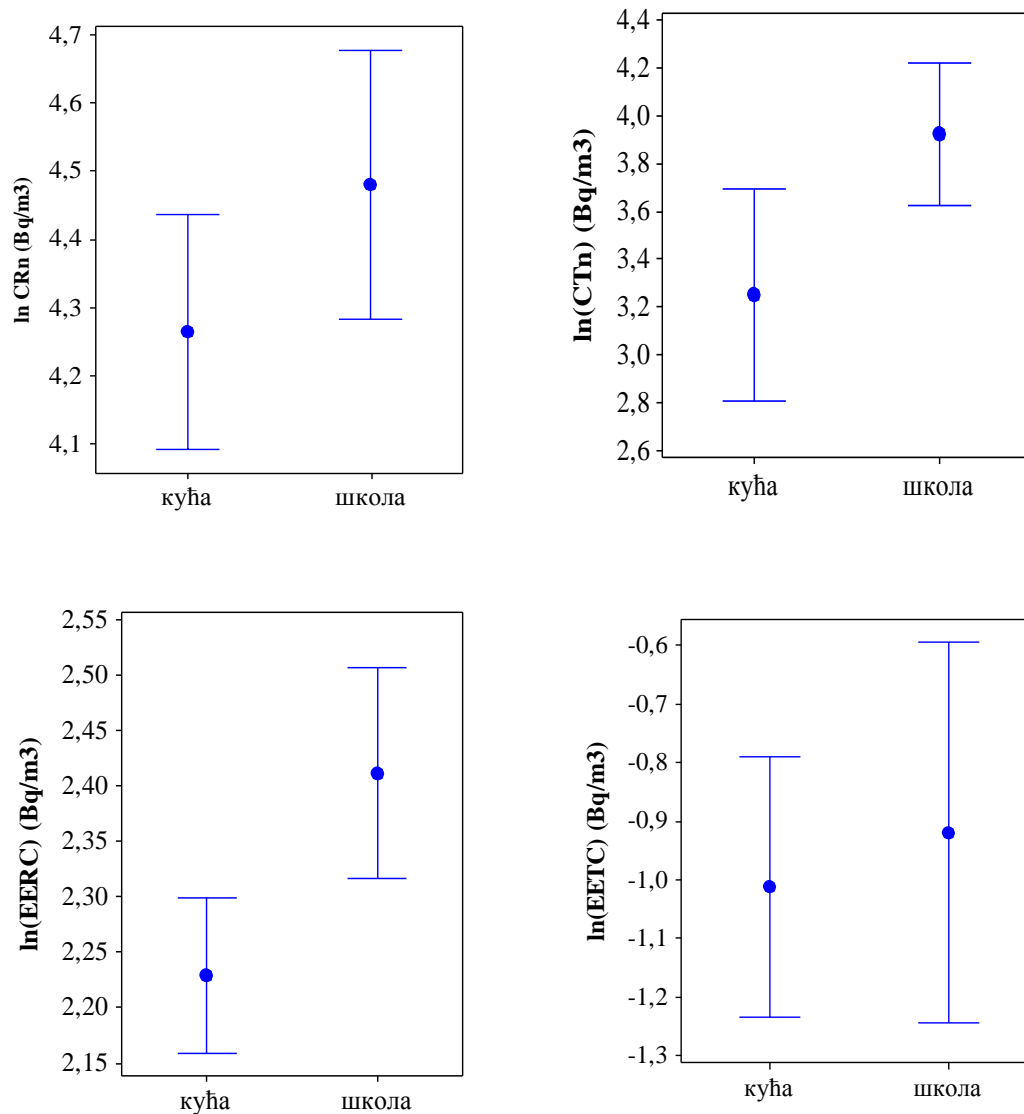
Табела 21. Параметри лог-нормалне и нормалне функције

	CRn	CTn	EERC	EETC	$\ln$ CRn	$\ln$ (CTn)	$\ln$ (EERC)	$\ln$ (EETC)
$\mu$	4,342	3,633	2,303	-0,975	4.342	3.633	2.303	-0.975
$\sigma^2$	0,553	0,763	0,055	0,510	0.553	0.763	0.055	0.510
KS p-value	0,146	0,428	0,700	0,955	0.146	0.428	0.700	0.955

Следећи корак је испитивање евентуалне разлике међу мереним концентрацијама у школама и кућама. После утврђивања хомогености група (варијабле су подељене у две групе: куће и школе) примењена је непараметарска и параметарска анализа. На слици 42. су приказане средње вредности  $\ln$  трансформисаних концентрација са 95% интервала поверење.

Следећи корак је испитивање евентуалне разлике међу мереним концентрацијама у школама и кућама. После утврђивања хомогености група: за радон (В,  $p=0,325$ ) за торон (В,  $p=0,088$ ) за EERC (В,  $p=0,445$ ) и EETC(В,  $p=0,239$ ) варијабле су подељене у две групе:

куће и школе, примењена је параметарска анализа. На слици 42. су приказане средње вредности  $\ln$  трансформисаних концентрација са 95% интервала поверења.



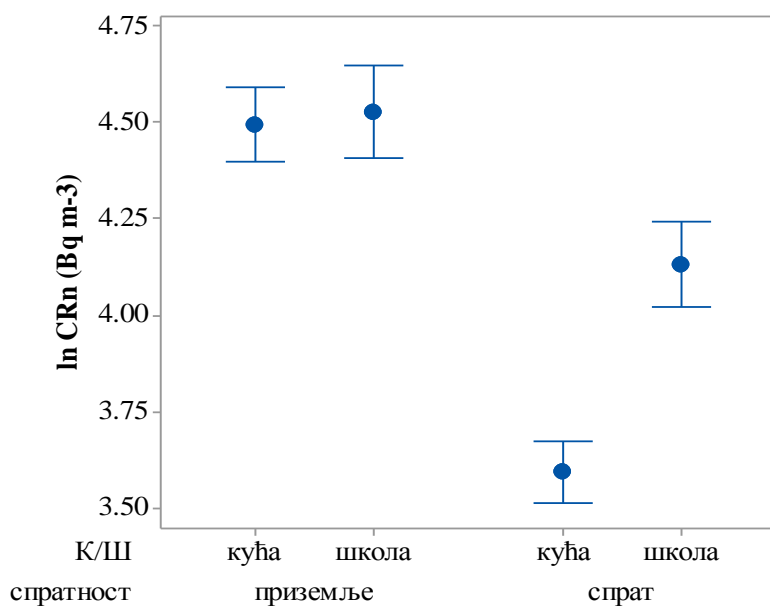
Слика 42. Поређење средњих вредности концентрација радона и торона и њихових продуката распада у кућама и школама

Из ових разматрања се види да су активности веће у школама него у кућама. Главни ралог може бит врста грађевинског материјала и начин градње објеката. Ако се погледа старост кућа, већина њих су новије градње тако да су коришћени материјали са бољом изолацијом и бољим квалитетом (пример употребе бетона при градњи или ситне опеке).

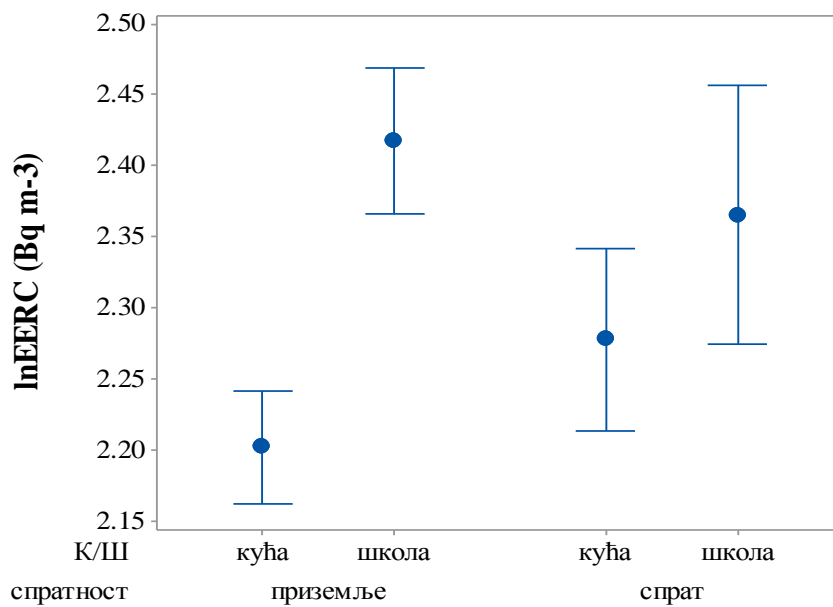
Већина школа је грађена у неком ранијем периоду и старост тих објеката је већа од старости кућа. Овде се не сме занемарити ни утицај вентилације јер је познато да величина просторије утиче на брзину вентилације а просторије у школама су много веће од просторија узрокованих кућа.

Следећи задатак је анализа утицаја других фактора на постојање или не постојање разлика међу кућама и школама.

На пример, за концентрацију радона је показано да је концентрација у кућама и школама на приземљу већа од концентрације на првом спрату, што је очекивано и потврђено у великом броју радова. Са слике 43. може да се приметити да су вредности концентрације радона у кућама и школама не разликују у приземљу (MW,  $p=0,714$  и  $t$ ,  $p=0,839$ ), док је на спрату та разлика уочљива и статистички значајна (MW,  $p=0,002$  и  $t$ ,  $p=0,001$ ). У случају распадних продуката радона случај је обрнут. Разлика међу школама и кућама постоји на приземљу а не по спратовима. Могуће објашњење за ову појаву је разлика у концентрацијама аеросола у школама и кућама (Слика 44).



Слика 43. Поредђење концентрације радона у школама и кућама на различитим спратовима



Слика 44. Поредбење EERC школама и кућама на различитим спратовима

Даље испитивање усмерено је на посматрање утицаја грађевинског материјала на концентрацију радона. У Табели 22. је приказана дескриптивна статистика измерених концентрација у школама и кућама груписана по врсти грађевинског материјала.

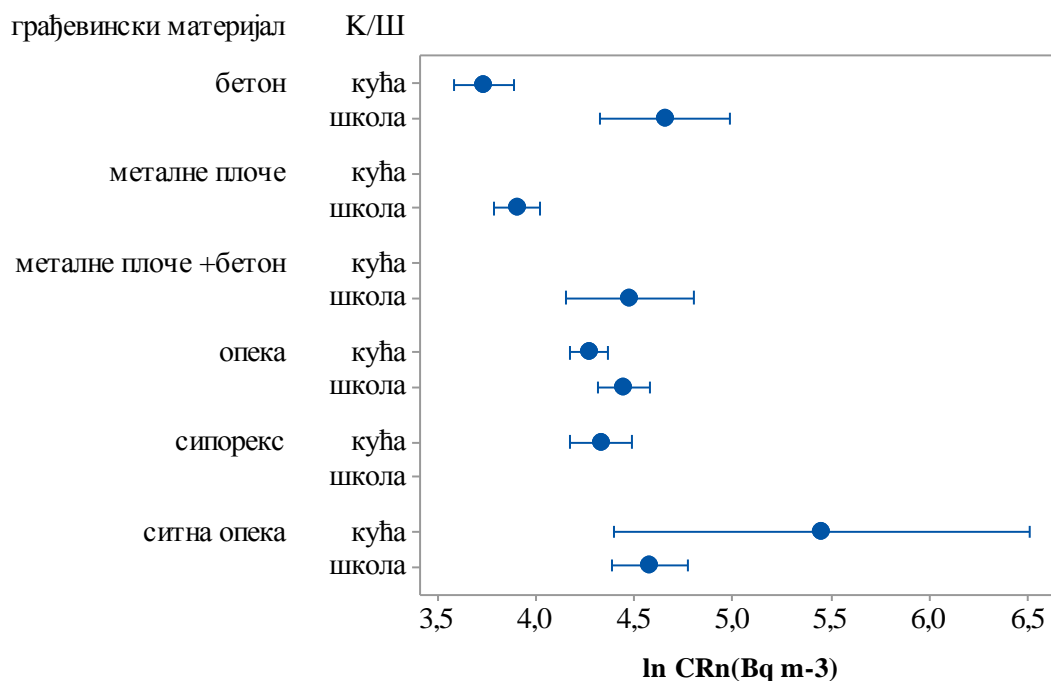
Табела 22. Дескриптивна статистика у школама и кућама (грађевински материјал)

	Грађевински материјал	No.	Мин	Мед	Мах	АС	СД	ГС	ГСД
<b>Rn (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	Опека/цигла	84	22	66	509	95	86	76	1,86
	Ситна цигла	10	59	139	1773	335	521	182	2,78
	Бетон	23	22	45	315	61	61	48	1,86
	Метал	2	42	45	48	45	4	45	1,10
	Сипорекс	8	30	158	374	168	105	137	2,14
<b>Tn (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	Опека/цигла	27	7	49	124	52	29	43	2,06
	Ситна цигла	3	2	51	79	44	39	20	7,45
	Бетон	11	7	26	198	46	54	31	2,40
	Метал	1	18	18	18	18		18	1,00
	Сипорекс	2	68	72	77	72	7	72	1,10
<b>EERC(Bq/m<sup>3</sup>)</b>	Опека/цигла	36	6,34	9,97	16,84	10,19	2,38	9,92	1,27
	Ситна цигла	4	7,48	9,75	13,53	10,13	2,51	9,90	1,27
	Бетон	16	6,86	11,06	14,76	10,49	2,59	10,19	1,29
	Метал	1	13,60	13,60	13,60	13,60		13,60	1,00
	Сипорекс	5	7,31	9,43	12,02	9,59	1,70	9,47	1,20
<b>EETC(Bq/m<sup>3</sup>)</b>	Опека/цигла	36	0,091	0,445	1,155	0,533	0,310	0,445	1,90
	Ситна цигла	4	0,120	0,220	0,510	0,267	0,169	0,233	1,82
	Бетон	16	0,092	0,341	0,811	0,375	0,240	0,298	2,07
	Метал	1	0,150	0,150	0,150	0,150		0,150	1,00
	Сипорекс	5	0,120	0,710	1,100	0,598	0,428	0,435	2,69

Разлике међу концентрацијама радона у школама и кућама у зависности од грађевинског материјала су представљене на слици 45. Значајно ниже концентрације су измерене у објектима грађеним од бетона (LSD,  $p=0,0015$ ) у односу на објекте изграђене од ситне опеке. Више концентрације измерене у објектима од ситне опеке у односу на објекта направљених од металних плоча (LSD,  $p=0,025$ ) и опеке (LSD,  $p=0,033$ ).

Разлике постоје између концентрација радона у кућама од бетона у односу на објекте грађене од сипорекса (LSD,  $p=0,015$ ).





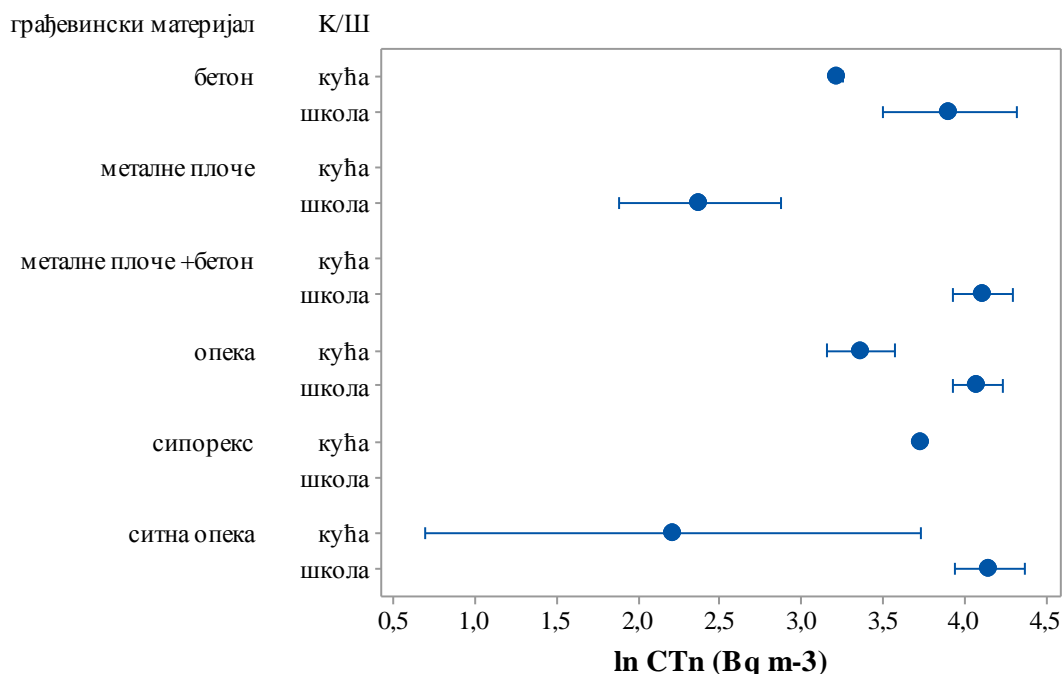
Слика 45. Средња концентрација радона (са 95% интервалом поверења) у школама и кућама у зависности од грађевинског материјала

Даље анализе су показале да је утицај бетона на концентрацију радона у школама и кућама различит. Наиме у бетонским школама су измерене више концентрације у односу на куће (MW.  $p=0,003$ ). Утицај на разлику у објектима од опека/цигле и ситне цигле није био значајан (MW.  $p=0,113$  и MW.  $p=0,117$ ). Због мале фреквенције мерења а самим тим великом варијацијом концентрације радона у школама где је коришћен сипорекс као грађевински материјал је тешко је просудити о значајности те разлике (MW.  $p=0,046$ ).

Из претходне анализе где се показало да концентрација торона у школама и кућама не зависи од спратности, можемо да претпоставимо да је  $^{232}\text{Th}$  у грађевинском материјалу главни извор торон гаса у већини случајева. Даље, због свог кратког периода полураспада (55,6 s) не може се очекивати од торона да мигрира на већој удаљености од зида. Као последица тога постоји јака зависност концентрације торона од удаљености од зида, а не постоји зависност од брзине измене ваздуха. С друге стране, његови потомци имају довољно дуг период полураспада ( $^{212}\text{Pb}$ ,  $T_{1/2}= 10,6$  хи  $^{212}\text{Bi}$ ,  $T_{1/2}= 1$  h) тако да се могу хомогено расподелити у просторији.

Имајући у виду да су детектори у школама били стављани на зид, а у кућама на растојању од 5 до 10 cm, ова разлика је објашњена. Потврда ове тврдње је и у разлици геометријске средње вредности односа концентрације радона и торона  $Rn/Tn$  у кућама и школама која јако зависи од позиције детектора [Tokonami et.al, 2004]. У овом истраживању  $Tn/Rn$  за школе је од 0,14 до 3,80 са аритметичком и геометричком средњом вредношћу од  $AC=1,35$  и  $GC=1,00$ ). док је за куће  $AC=0,79$  и  $GC=0,56$  (0,02-2,00) што упућује на утициј позиције детектора.

Због неуједначене методологије постављања детектора и малих фреквенција резултата по групама грађевинског материјала, тешко је добити неки утемељен закључак. На слици 46. су представљене средње концентрације торона груписане по врсти грађевинског материјала у кућама и школама. Примећује се разлика између концентрације торона по групама.



Слика 46. Средње концентрације торона у школама и кућама груписане по врсти грађевинског материјала

При анализи утицаја грађевинског материјала на концентрацију торона посебно за школе а посебно за куће, може да се уочи разлика у концентрација. Наиме у објектима од опеке концентрације у школама су више у односу на куће од опеке (LSD,  $p=0,013$ ). И ако

због малог броја мерења статистички није потврђено, слично је и са објектима направљени од ситне опеке: веће су концентрације у школама у односу на куће што још једном потврђује утицај положаја детектора у школама у односу на куће.

#### 5.4. Фактори равнотеже за радон и торон

Са дозиметриског аспекта главни разлог мерења концентрација радона и торона и њихових продуката распада је процена дозе. Директна мерења концентрације краткоживећих потомака распада радона и торона су јако сложена и ограничена. У циљу процене дозе, обично се процењује  $EEC$  користећи факторе равнотеже посебно за радон и торон из мерене концентрације гаса (радона и торона):

$$EEC = F \cdot C \quad (5.4)$$

где је:  $EEC$  подразумева  $EECR$  за радон и  $EECT$  за торон (изражена у  $Bq/m^3$ ),  $C$  претставља концентрацију радона (торона) ( $Bq/m^3$ ). Бездимензионална величина:  $F$  је фактор равнотеже која изражава степен (неравнотеже) између краткоживећих потомака и самог гаса ( $F = EEC/C$ ).

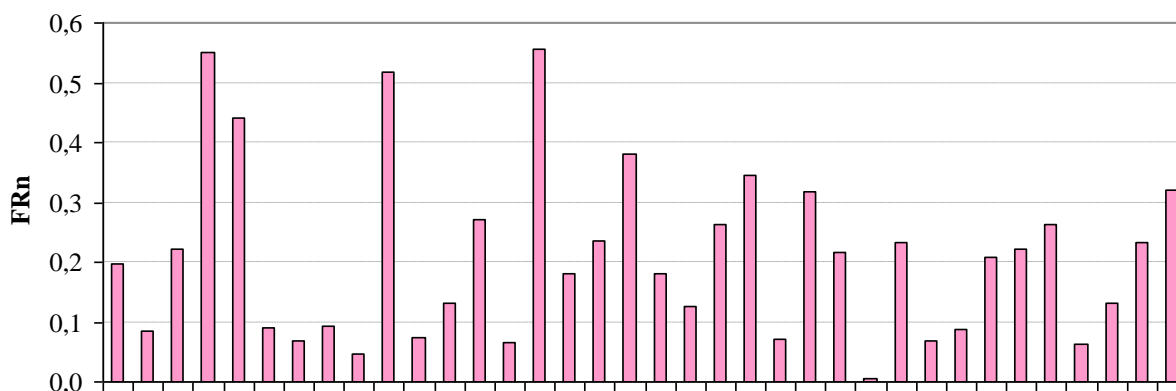
Раније технике мерења концентрације потомака радона и торона су углавном биле засноване на краткотрајним мерењима [Nemeth et al., 2005], што уводи значајну несигурност у процени експозиције, јер и сам гас као и његови потомци имају временску варијацију, како дневну [Mehra et al., 2010] тако и сезонску [Ramola et al., 2005], [Barooah et al., 2003].

У Табели 23. је представљена дескриптивна статистика временски интегрисаних фактора равнотеже за радон и торон посебно у школама и посебно у кућама Бања Луке, како и збирна статистика која описује вредности фактора равнотеже у испитиваном региону.

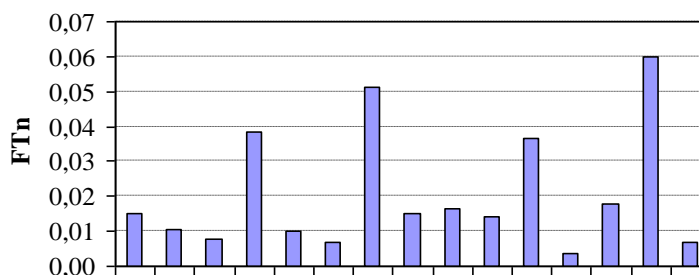
Табела 23. Дескриптивна статистика фактора равнотеже за радон и торон

	FRn			FTn		
	укупно	кућа	школа	укупно	кућа	школа
Број мерења	61	36	25	42	17	25
Минимум	0,004	0,004	0,015	0,003	0,004	0,003
Медијана	0,186	0,203	0,173	0,010	0,014	0,009
Максимум	0,558	0,558	0,326	0,060	0,060	0,048
Аритметичка средња вредност	0,197	0,213	0,176	0,014	0,019	0,011
Стандардна девијација	0,126	0,146	0,086	0,013	0,016	0,010
Стандардна грешка	0,016	0,025	0,018	0,002	0,004	0,002
Геометриска средња вредност	0,153	0,157	0,146	0,010	0,014	0,008
Геометриска стандардна девијација	0,153	0,157	0,146	0,010	0,014	0,008
Лог-нормална дистрибуција (KS, $p>0.05$ )	0,288	0,493	0,354	0,963	0,805	0,823

Геометријска средња вредност 0,16 за фактор равнотеже радона је значајно нижа у однос на препоручену 0,4 [ICRP, 2004]. Овако ниске вредности потичу због великих вредности торона у школама. Фактор равнотеже за Бања Луку има вредности од 0,004 па до 0,6, на Косову тај интервал је од 0,024 до 0,2.[Gulan,2012], док су истраживања на Хималајима показала још већу варијацију фактора равнотеже за радон од 0,02 па до 0,9 [Ramolaetal., 2005]. Ове екстремне вредности било да се ради о малим или великим вредностима треба узети са резервом. На слици 47а и 47б. су представљене вредности равнотежног фактора за радон и торон у кућама.



Слика 47а. Вредности фактора равнотеже за радон у кућама

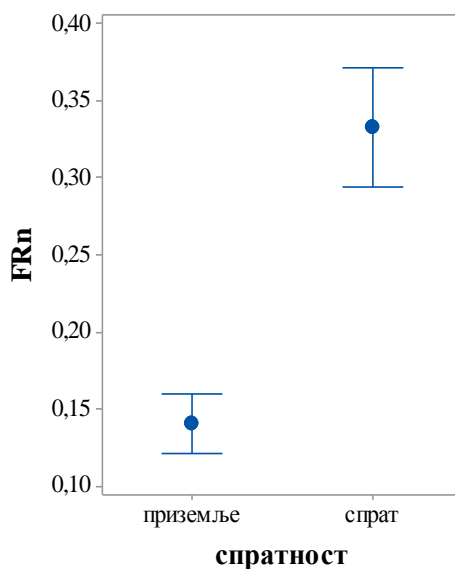


Слика 47б. Вредности фактора равнотеже за торон у кућама

Фактора равнотеже торонових потомака одређује се из симултаних мерења гаса и концентрације продуката распада. [Janik et al, 2013] су објавили збирна истраживања радона, торона и торонових продуката распада у неколико земаља, где је геометријска средња вредност фактора равнотеже торонових потомака за Кинеске домове 0,013 и 0,006, [Tokonami, 2005, Yamada et al., 2006], док за Ирске и Корејске домове објављена вредности је 0,018 и 0,017 [McLaughlin et al., 2011; Kim et al, 2005].

Даље испитивање је било орјентисано да се испитају доступни фактори објекта (спратност и грађевински материјал) који утичу на вредности фактора равнотеже радона и торона.

Анализа фактора равнотеже радона је показала да се средње вредности не разликују у зависности од грађевинског материјала и код радона и торона. Фактор који се показао као значајано различит је онај који се односи на спратност просторија (АНОВА,  $p=0,0004$ ; KW,  $p=0,577$ ) али само за радон. Наиме, веће вредности фактора равнотеже радона се односе на приземне просторије у односу на просторије на спрату што се види на слици 48.



Слика 48. Поређење фактора равнотеже радонових потомака по спратовима

#### 5.4.1. Процена ефективне дозе која потиче од радона и краткоживећих потомака у школама и кућама

Процена годишње ефективне дозе коју прима становништва града Бања Луке је направљена користећи следећу једначину:

$$E_{Rn} = C_{Rn} \cdot F_{Rn} \cdot t \cdot D_{Rn} \quad (5.5)$$

где је:  $C_{Rn}$  - концентрација радона,  $F_{Rn}$  - фактор равнотеже,  $t$  је време заузетости просторије на годишњем нивоу а  $D_{Rn}$  - дозни конверзионни фактор. За куће је узето време заузетост на годишњем нивоу од 7000 h, док је за школе направљена посебна процена у сразмери активностима наставника и ученика:

За ученике:

$$t = (52 \text{ седмице/год} - 15 \text{ седмица распуста/год}) \times 25 \text{ h /седмично} = 925 \text{ h /год}$$

за наставнике:

$$t = (52 \text{ седмице/год} - 6 \text{ седмица распуста/год}) \times 30 \text{ h /седмично} = 1380 \text{ h/год}$$

Сви коришћени параметри су наведени у Табели 24.

Табела 24. Параметри за израчунање доза

		$F_{Rn}$	$t$ (h)	$D_{Rn}$ (nSvBq <sup>-1</sup> m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
Куће	Становништво	0,16	7000	9
	Наставници	0,16	1380	9
Школе	Ученици	0,16	925	9

Имајући у виду различито време третирања, направљена је процена дозе за све три категорије куће (становништво) и школе (наставници и ученици). Дескриптивна статистика је дата у Табели 26.

Табела 26. Процењена ефективна годишња доза од радона у кућамаи школама

	E(mSv/god)		
	Куће	Школе	
	Становништво	Наставници	Ученици
Број мерења	81	44	44
Минимум	0,20	0,07	0,04
Медиана	0,62	0,14	0,09
Максимум	17,88	0,81	0,54
Средња вредност	1,04	0,21	0,14
Процењена стандардна девијација	2,07	0,19	0,13
Геометријска средина	<b>0,71</b>	<b>0,17</b>	<b>0,11</b>
Геометријска стандардна девијација	2,17	1,97	1,94

Геометријска средња вредност ефективне годишње дозе 0,71 mSv/god коју прима становништво града Бања Луке од радона и краткоживећих потомака распада радона. Поређења ради средње вредности на светском нивоу од свих извора зрачења износи 2,4 mSv/god објављеном [UNSCEAR, 2000] извештају. У поређењу са суседним земљама приближна је вредности дозама измереним на Црногорском приморју која износи 0,5 mSv/god [Antović et al, 2007], а нижа је у односу на дозе објављене за Хрватску 2,2 mSv/god [Radolić, 2006] и Македонију 2,6 mSv/god [Stojanovska et al., 2012].

Битно је напоменути да је процена дозе у свим тим цитираним радовима направљена на основу предложеног фактора равнотеже од стране ИЦРП од 0,4 а не на основу измерених концентрација продуката распада. У неким случајевима посебно при вишим

концентрацијама радона може да дође до прецењивања дозе имајући у виду да је у случају одређени фактор равнотеже за радон у Бања Луци за фактор 2 мањи у односу на предложени 0,4 који се обично узима за процену дозе из концентрације радона.

#### 5.4.2. Процена дозе за концентрацију торона у школама и кућама

Процена годишње ефективне дозе коју прима становништво града Бања Луке је направљена користећи следећу једначину:

$$E_{Tn} = EETC \cdot t \cdot D_{Tn} \quad (5.6)$$

где је: EETC концентрација продуката распада,  $t$  је време заузетости просторије на годишњем нивоу а  $D_{Tn}$  дозни конверзиони фактор.

У случају торона, процена дозе је направљена преко продуката распада, а не користећи фактор равнотеже и концентрацију торона ради неупотребљивости концентрација торона у школама. За време заузетости просторија, у овом случају је исто како и за процену дозе код радона и за конверзиони фактор је узета вредност од 40 nSv/h/Bq/m<sup>3</sup> предложен од стране [UNSCEAR, 2000]. Резултати су представљени у Табели 26.

Табела 26. Процењена ефективна годишња доза од торона у школама и кућама

	E(mSv/god)		
	Куће	Школе	
	Становништво	Наставници	Ученици
Број мерења	36	25	25
Минимум	0,028	0,005	0,003
Максимум	0,308	0,064	0,043
Средња вредност	0,124	0,029	0,019
Процењена стандардна девијација	0,077	0,019	0,013
Геометријска средина	0,101	0,022	0,015
Геометријска стандардна девијација	1,949	2,201	2,201



## 5.5. Мерење концентрација радона активном методом (RAD 7)

### 5.5.1. Мерење концентрације радона у школама

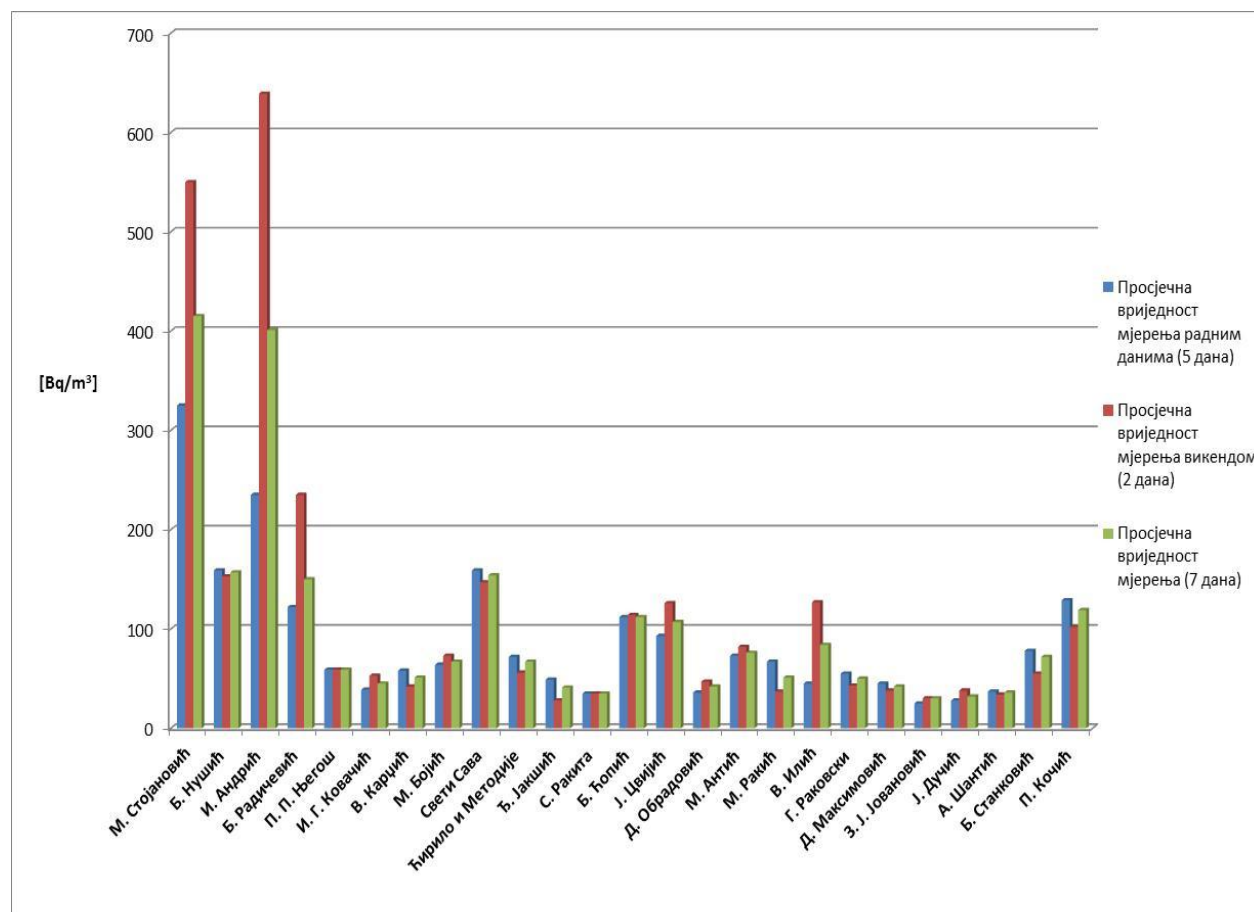
Резултати мерења концентрације радона активном методом у школама на подручју Града Бања Луке приказани су табели 25. Дате су вредности просечних концентрација радона радним даном, тј. када се просторије школа користе, од понедељка од 7 часова до петка 17 часова. Као викенд је узето време између петка од 19 часова до понедељка 7 часова. Табеларни приказ ових мерења дат је Табели 27, а графички у Прилогу 2.

Табела 27. Резултати мерења концентрације радона у школама уређајем Rad 7

Р. Б.	Назив школе	Просечна вредност мерења (7 дана) [Bq/m <sup>3</sup> ]	Просечна вредност мерења (5 радних дана) [Bq/m <sup>3</sup> ]	Просечна вредност мерења (викенд 2 дана) [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	Младен Стојановић, Бронзани Мајдан	415	325	550
2	Бранислав Нушић, Топлице	157	159	153
3	Иво Андрић, Центар	401	235	639
4	Бранко Радичевић, Старчевица	150	122	235
5	Петар Петровић Његош, Мејдан	59	59	59
6	Иван Горан Ковачић, Буцак	45	39	53
7	Вук Карађић, Борик	51	58	42
8	Милутин Бојић, Поткозарје	67	64	73
9	Свети Сава, Лауш	154	159	147
10	Ћирило и Методије, Пискавица	67	72	56
11	Ђура Јакшић, Шарговац	41	49	28
12	Станко Ракита, Врбања	35	35	35
13	Бранко Ћопић, Борик	112	112	114
14	Јован Цвијић, Центар	36	37	34
15	Доситеј Обрадовић, Мејдан	42	36	47
16	Мирослав Антић, Бистрица	76	73	82
17	Милан Ракић, Карановац	51	69	26
18	Војислав Илић, Крупа на Врбасу	84	45	127
19	Георгије Раковски, Нова Варош	50	55	43
20	Десанка Максимовић, Драгочај	42	45	38

21	Змај Јова Јовановић, Хисете	28	25	32
22	Јован Дучић, Залужани	32	28	38
23	Алекса Шантић, Малта	119	129	102
24	Борислав Станковић, Буцак	72	78	55
25	Петар Кочић, Хан Кола	119	129	102

Резултати мерења из Табеле 27. су приказани графички слика 49.



Слика 49. Графички приказ недељних концентрација радона измерених у школама

На слици 49. се види значајан пораст концентрације радона викендом када нема размене ваздуха са спољашњом средином. То се посебно односи на школе са високим просечним концентрацијама радона. Код школа са концентрацијама радона испод  $100 \text{ Bq/m}^3$  овај ефекат није изражен.

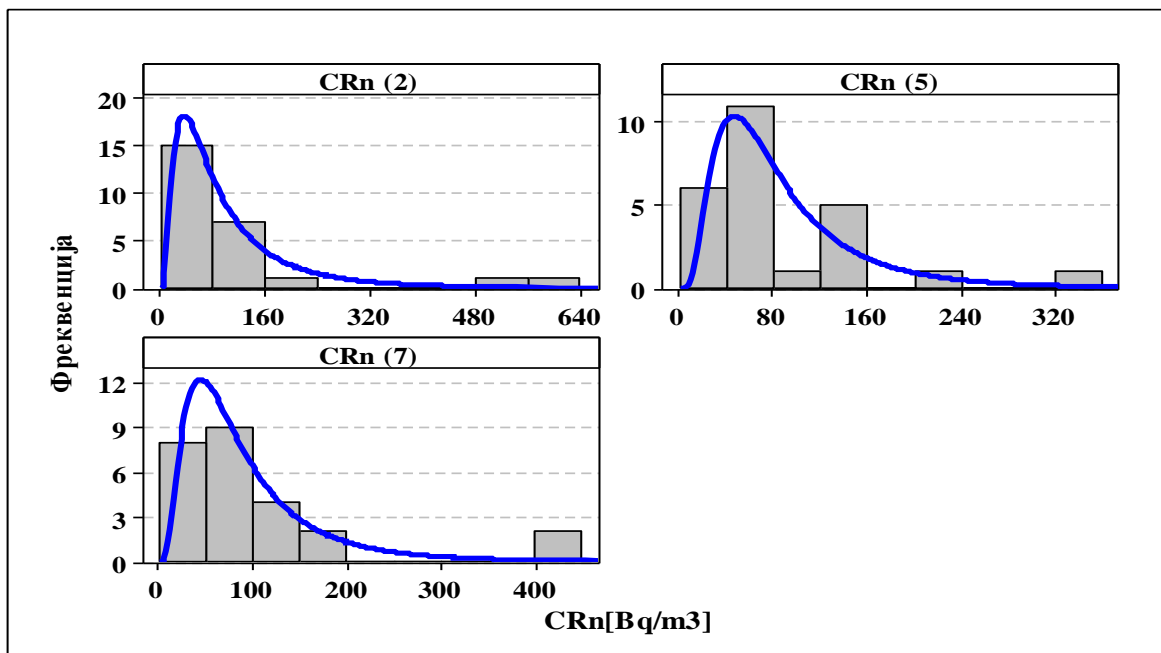
Дескриптивна статистика свих измерених резултата у школама на подручју града Бања Луке је приказана у Табели 28.

Табела 28. Дескриптивна статистика резултата мерења уређајем Rad 7

	$C_{Rn}(7)$	$C_{Rn}(5)$	$C_{Rn}(2)$
Број мерења	25	25	25
Минимум	28	25	26
Медијана	67	64	56
Максимум	415	325	639
Аритметичка средња вредност	99	91	116
Стандардна девијација	100	72	153
Стандардна грешка	20	14	31
Геометријска средња вредност	73	72	74
Геометријска стандардна девијација	2,02	1,94	2,32

Приказани резултати концентрација радона у табели 28 представљају мерења  $C_{Rn}(7)$  - просечне резултате мјерења за 7 дана (комплетна недеља),  $C_{Rn}(5)$  - просечне резултате мерења за 5 дана (радни дани у недељи) и  $C_{Rn}(2)$  - просечне резултате мерења за 2 дана (викенд).

Хистограми резултата измерене концентрације радона у школама фитовани са лог-нормалном функцијом за сва три мерења су приказана на слици 50.



Слика 50. Хистограми концентрације радона измерене помоћу уређаја RAD7

Од укупно 25 измерених локација у 23 просторије концентрација радона је била мања од  $200 \text{ Bq/m}^3$ , док је само у две просторије била већа од  $200 \text{ Bq/m}^3$ . Највећа фреквенција је у интервалу до  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

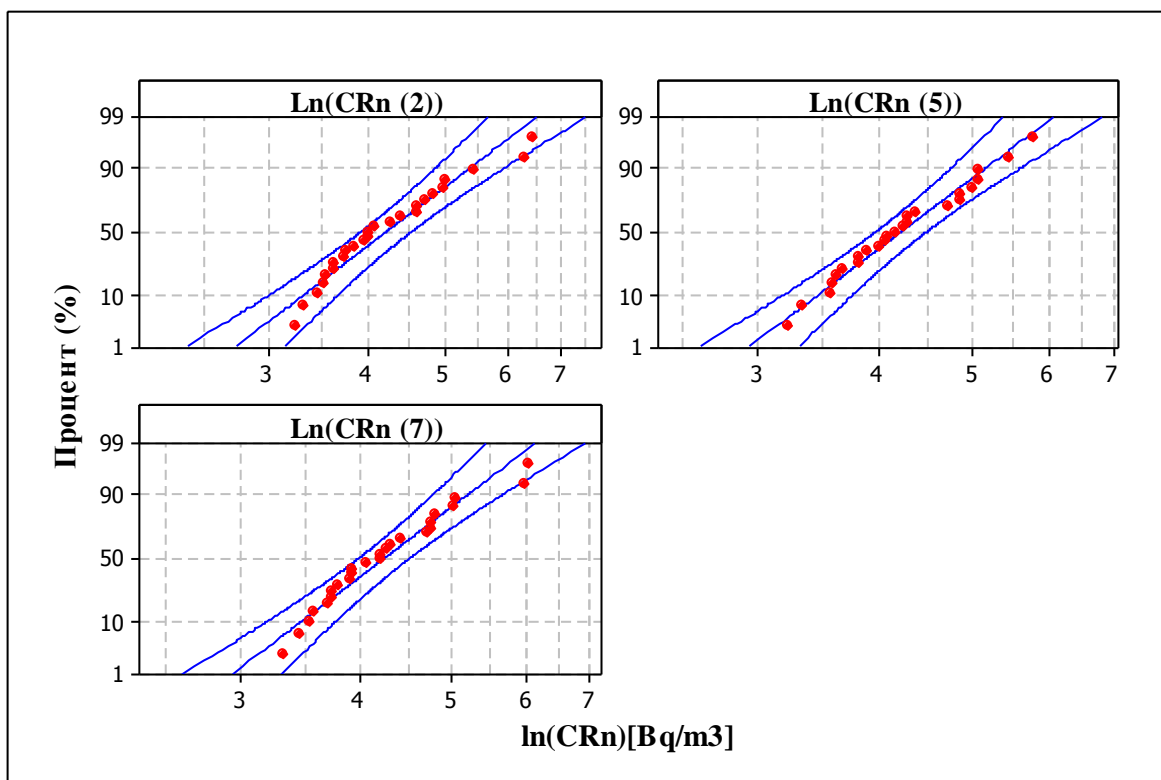
Поред визуелне процене, очекивана лог-нормална расподела је тестирана примењујући Kolmogorov-Smirnov test (KS) на 95% нивоу поверења. У случају када је вероватност грешке  $p$  већа од 0,05 потврђена је унапред постављена хипотеза о постојању статистички значајне разлика између експерименталне и емпиријске расподеле резултата. У Табели 29. су дати параметри лог-нормалне функције ( $\mu$ ,  $\sigma$ ), веројатност грешке  $p$  KS теста и потврда значајности расподеле за све три групе резултата концентрација радона.

Табела 29. Параметри лог-нормалне функције, веројатност грешке ( $p$ ) и значајност KS теста за три групе мерења концентрације радона.  $C_{Rn}(7)$ ,  $C_{Rn}(5)$  и  $C_{Rn}(2)$

	$\mu$	$\sigma^2$	Kolmogorov-Smirnov тест	Лог-нормална дистрибуција
$C_{Rn}(7)$	4,297	0,512	0,751	Статистички значајна
$C_{Rn}(5)$	4,27	0,455	0,8	Статистички значајна
$C_{Rn}(2)$	4,27	0,455	0,8	Статистички значајна

За потребе детаљније статистичке анализе, да би се умањио утицај екстремних вредности на крајњи исход тестова, прорачунати су природни логаритми измерених концентрација.

Хипотеза да логаритми концентрације радона имају нормалну расподелу је потврђена за три групе мерења (KS,  $p > 0,05$ ). Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона са 95% границама значајности су приказане на слици 51.



Слика 51. Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона (са 95% границама значајности)

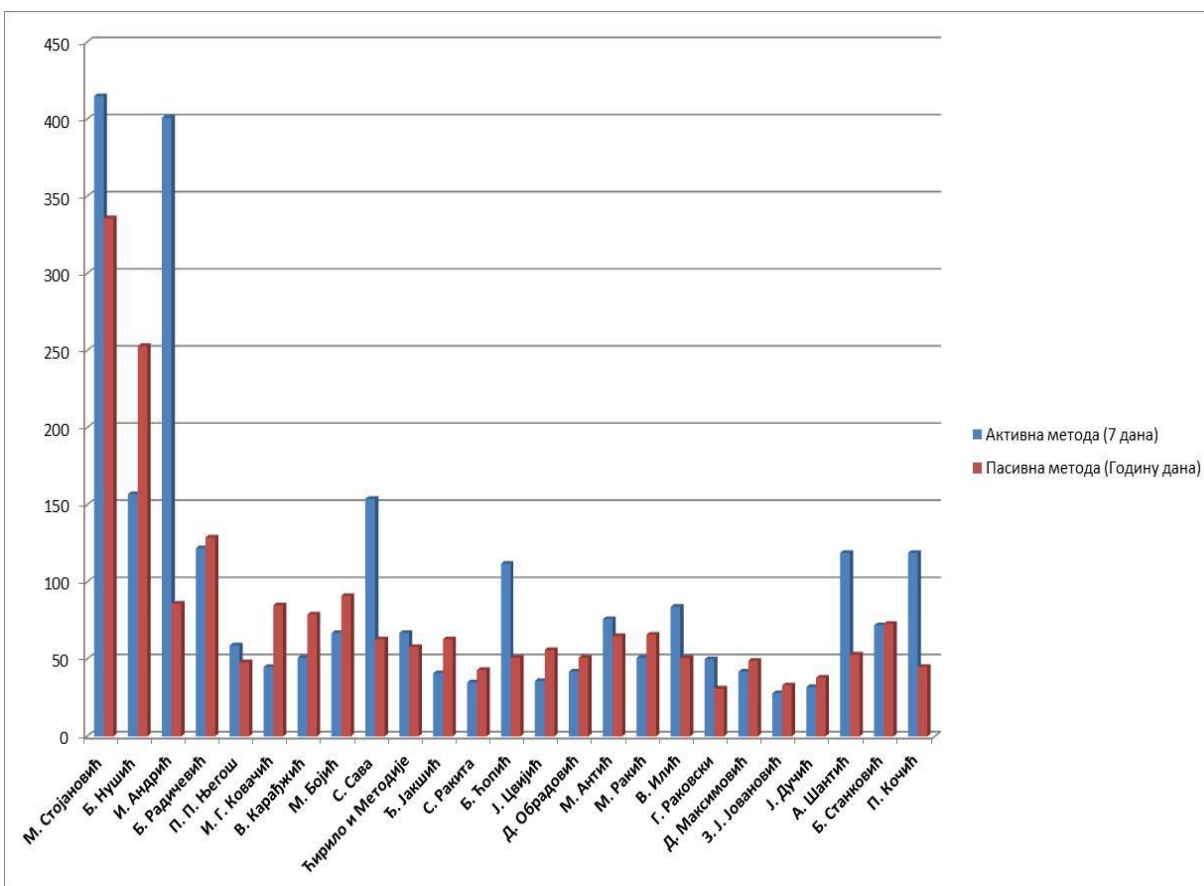
#### 5.5.1.1. Резултати мерења концентрације радона активном методом (Rad7) и пасивном методом

Поређење резултата концентрација радона измерених активном и пасивно методом мерења (CR – 39 детектори, који су се налазили у истој просторији где се врши мерење и активном методом) у школама на подручју града Бања Луке приказани су у Табели 30.

Табела 30. Резултати мерења активном и пасивном методом

Р. Б.	Назив школе	Активна метода (7 дана) [Bq/m <sup>3</sup> ]	Пасивна метода (годину дана) [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	Младен Стојановић Бронзани Мајдан	415	336
2	Бранислав Нушић Топлице	157	253
3	Иво Андрић Центар	401	86
4	Бранко Радичевић Старчевица	122	129
5	Петар Петровић Његош Мејдан	59	48
6	Иван Горан Ковачић Буцак	45	85
7	Вук Караџић Борик	51	79
8	Милутин Бојић Поткозарје	67	91
9	Свети Сава Лауш	154	63
10	Ћирило и Методије Пискавица	67	58
11	Ђура Јакшић Шарговац	41	63
12	Станко Ракита Врбања	35	43
13	Бранко Ћопић Борик	112	51
14	Јован Цвијић Центар	36	56
15	Доситеј Обрадовић Мејдан	42	51
16	Мирослав Антић Бистрица	76	65
17	Милан Ракић Карановац	51	66
18	Војислав Илић Крупа на Врбасу	84	51
19	Георгије Раковски Нова Варош	50	31
20	Десанка Максимовић Драгочај	42	49
21	Змај Јова Јовановић Хисете	28	33
22	Јован Дучић Залужани	32	38
23	Алекса Шантић Малта	119	53
24	Борислав Станковић Буцак	72	73
25	Петар Кочић Хан Кола	119	45

Графички приказ резултата мерења концентрација радона активном и пасивном методом приказан је у Табели 30 и представљен је на слици 52.



Слика 52. Графички приказ концентрације радона измерене помоћу активне и пасивне методе

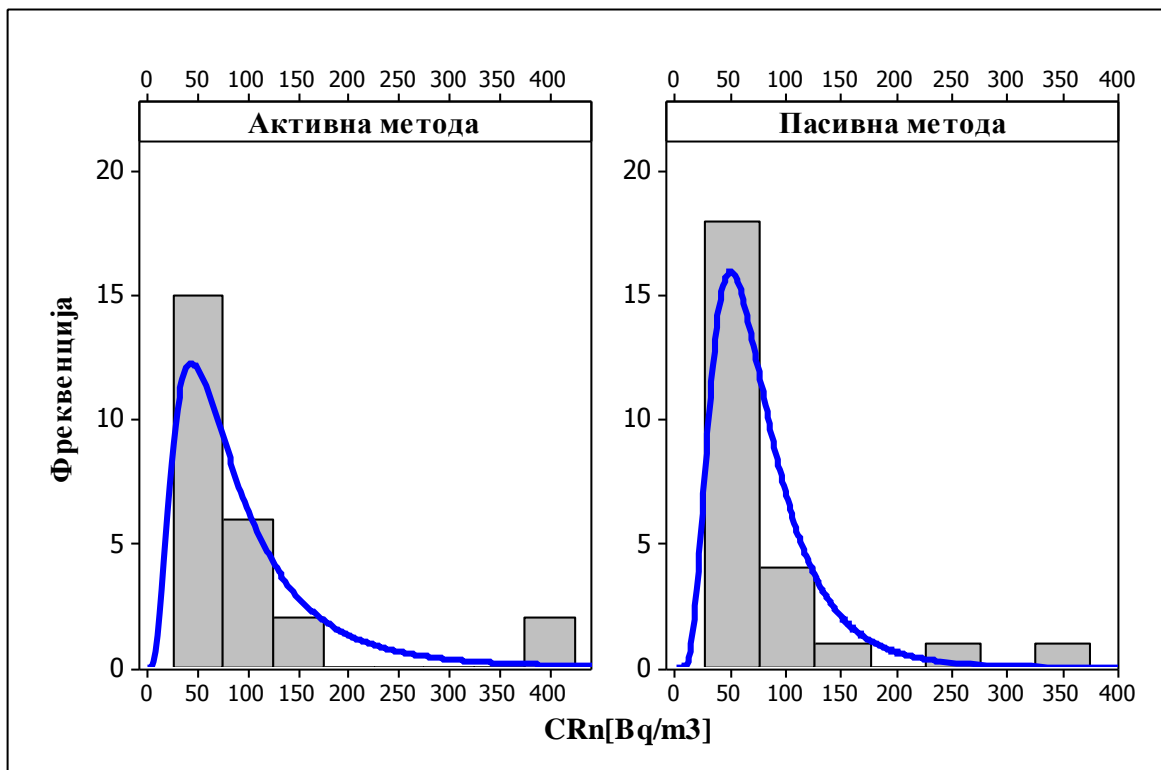
Дескриптивна статистика измерених резултата активном и пасивном методом у школама на подручју града Бања Луке је приказана у Табели 31.

Табела 31. Дескриптивна статистика измерених резултата активном и пасивном методом

	Активна метода	Пасивна метода
Број мерења	25	25
Минимум	28	31
Медијана	67	58
Максимум	415	336
Аритметичка средња вредност	99	80
Стандардна девијација	100	69
Стандардна грешка	20	14
Геометриска средња вредност	73	66
Геометриска стандардна девијација	2,02	1,72

Приказани резултати у Табели 31. представљају просечне концентрације радона мерене за 7 дана активном методом и просечне концентрације радона мерене годину дана пасивном методом.

Хистограми резултата измерене концентрације радона у школама фитовани са лог-нормалном функцијом за мерења су приказани на слици 53.



Слика 53. Хистограми концентрације радона измерене помоћу активне и пасивне методе

Од укупно 25 измерених локација са обе методе у истим просторијама, у 23 просторије концентрација радона је била мања од  $200 \text{ Bq/m}^3$ , док је већа од  $200 \text{ Bq/m}^3$  била регистрована само у две просторије. Највећа фреквенција је у интервалу до  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

Поред визуелне процене, очекивана лог-нормална расподела је тестирана примењујући Kolmogorov-Smirnov test (KS) на 95% нивоу поверења. У случају када је вероватност грешке  $p$  већа од 0,05 потврђена је унапред постављена хипотеза да постоји статистички значајна разлика између експерименталне и емпирске дистрибуције резултата. У Табели 32. су презентовани параметри лог-нормалне функције ( $\mu$ ,  $\sigma$ ), вероватноћа грешке  $p$  KS теста и потврда значајности дистрибуције за обе групе резултата концентрација радона.

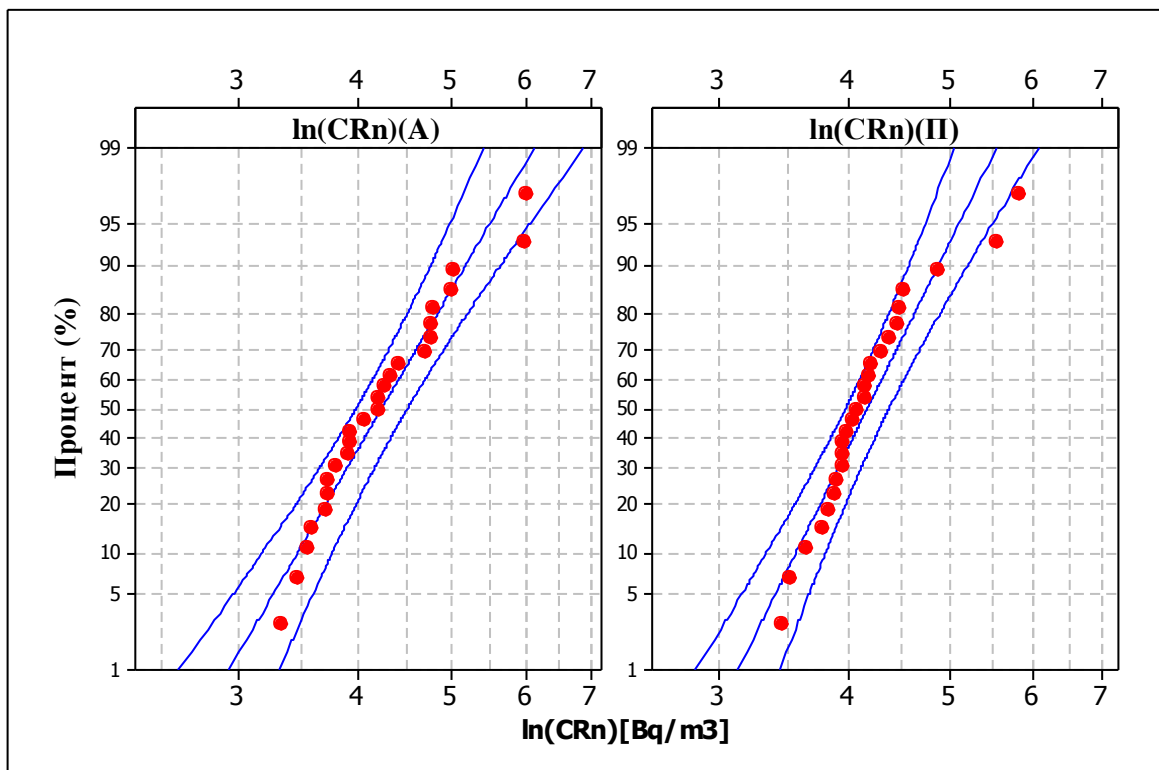


Табела 32. Параметри лог-нормалне функције, веројатност грешке ( $p$ ) и значајност KS теста за две групе мерења концентрације радона

	$\mu$	$\sigma^2$	Комогоров Смирнов $p$	Log-нормална дистрибуција
Активна метода	4,297	0,512	0,751	Статистички значајна
Пасивна метода	4,187	0,306	0,405	Статистички значајна

За потребе детаљније статистичке анализе, да би се умањио утицај екстремних вредности на крајњи исход тестова, прорачунати су природни логаритми измерених концентрација.

Хипотеза да логаритми концентрације радона имају нормалну дистрибуцију је потврђена за обе групе мерења (KS,  $p > 0,05$ ). Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона са 95% границама значајности су приказане на слици 54.



Слика 54. Кумулативне фреквенције логаритмоване концентрације радона (са 95% границама значајности)

После "нормализације" резултата и провере њихове хомогености примењујући Bartlett-ов тест ( $B$ ,  $p>0,05$ ), испитивана је корелација међу резултатима концентрација радона. Примењен је модел параметријске линеарне регресије ( $LR$ ,  $p<0,05$ ).

Степени корелације међу резултатима концентрације радона, изражени преко Пирсоновог коефициента детерминације ( $R^2$ ) је приказан у Табели 33.

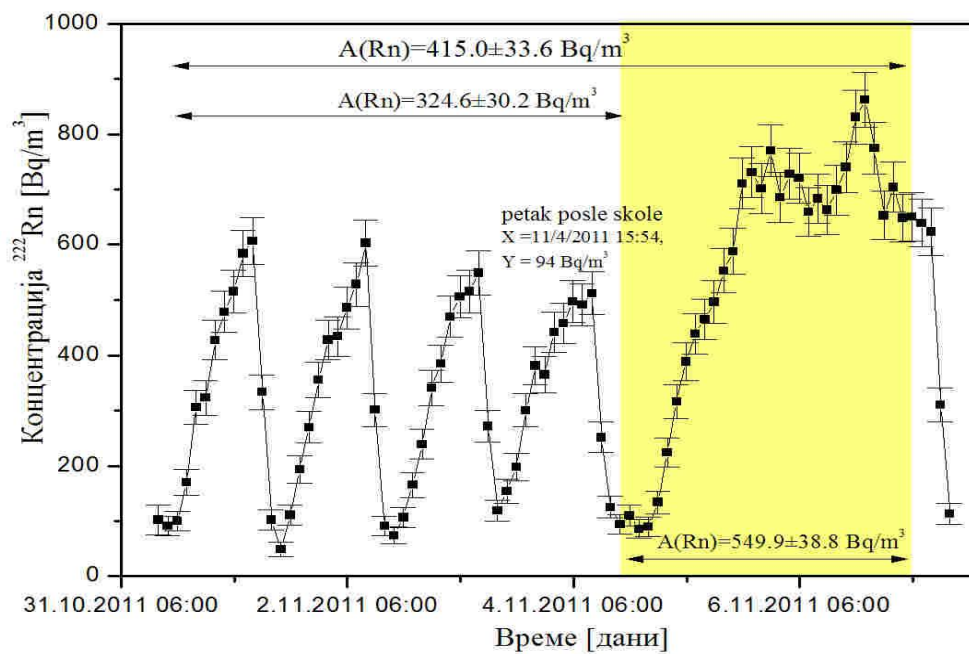
Табела 33. Коефицијенти детерминације

	$R^2$			
	$\ln(CR_n)$ (A) (7 дана)	$\ln(CR_n)$ (A) (5 дана)	$\ln(CR_n)$ (A) (2 дана)	$\ln(CR_n)$ (П)
$R^2$				
$\ln(CR_n)$ (A) (7 дана)	1			
$\ln(CR_n)$ (A) (5 дана)	0,958	1		
$\ln(CR_n)$ (A) (2 дана)	0,954	0,8613	1	
$\ln(CR_n)$ (П)	0,653	0,668	0,629	1

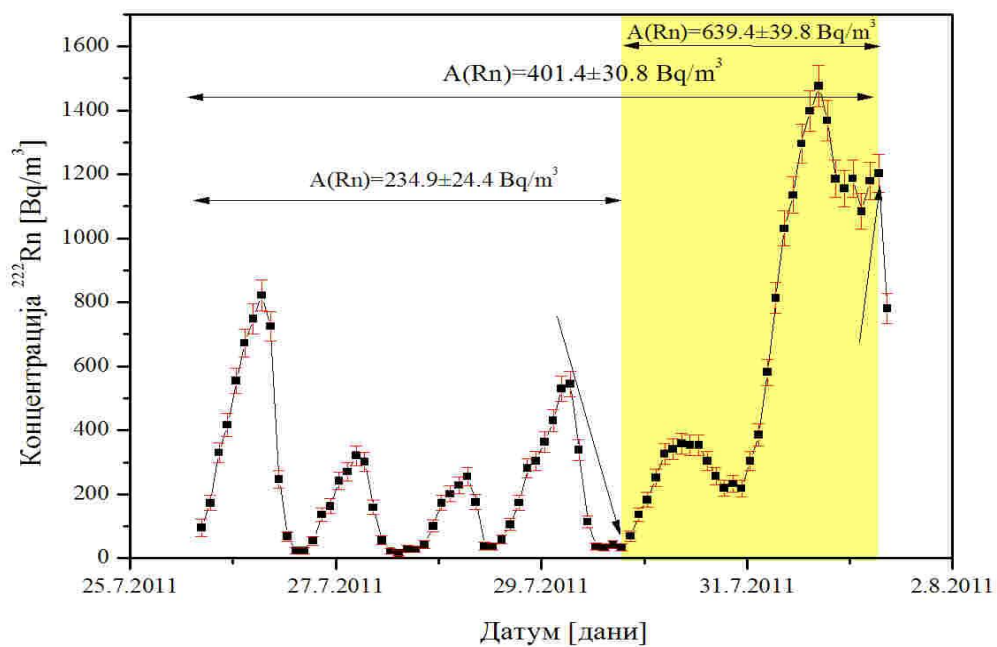
Из Табеле 33. се види да постоји корелација међу измереним концентрацијама за седам, пет и два дана. Међутим та корелација је много мања у поређењу са пасивном методом.

#### 5.5.1.2. Временска варијација измерених концентрација радона

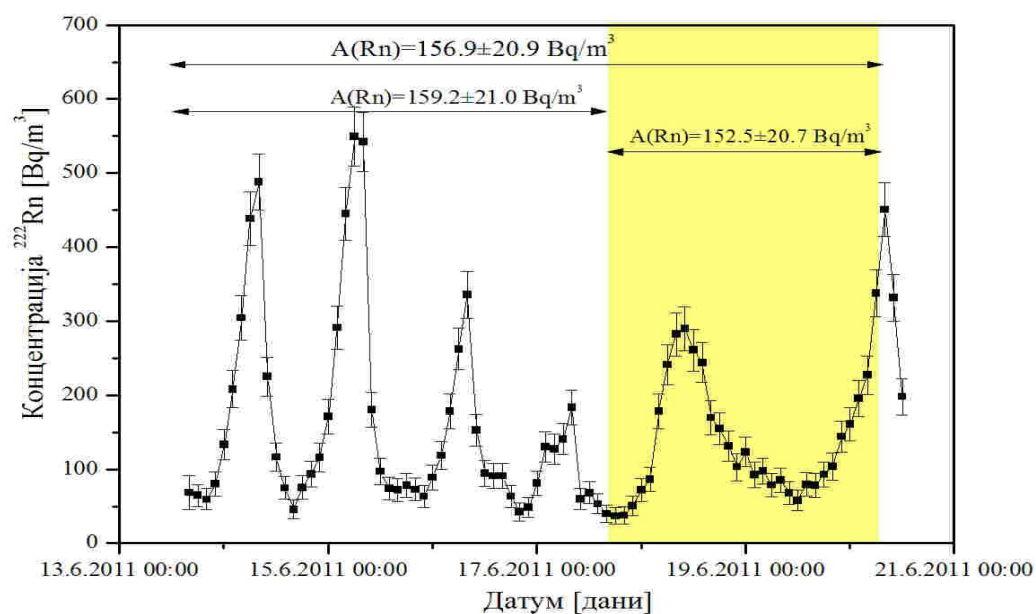
Мерење концентрација радона уређајем Rad 7 је извршено у свих 25 третираних основни школа Града Бања Луке. У овом поглављу је приказано 5 школа код којих су измерене вредности повишене. У ових пет школа: М. Стојановић (Слика 55), Б. Ћопић (Слика 56), Б. Нушић (Слика 57), С.Сава (Слика 58) и Б. Радичевић (Слика 59), просечне концентрације радона су изнад контролног нивоа ( $150 \text{ Bq/m}^3$ ). Дијаграми преосталих 20 школа код којих су измерене концентрације испод контролног нивоа ( $150 \text{ Bq/m}^3$ ) налазе се у Прилогу 2. овог рада.



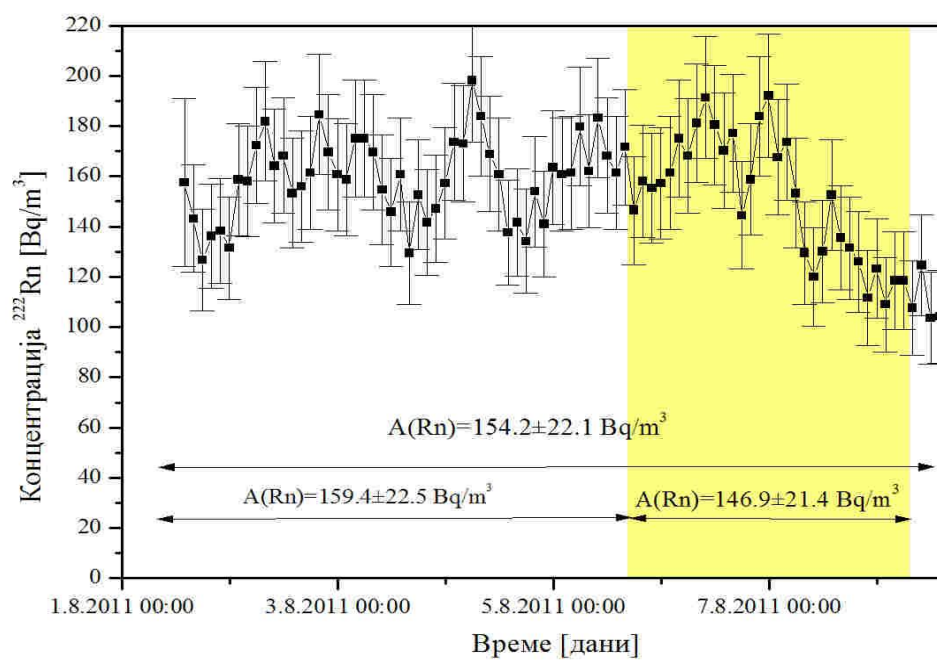
Слика 55. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Младен Стојановић Бронзани Мајдан)



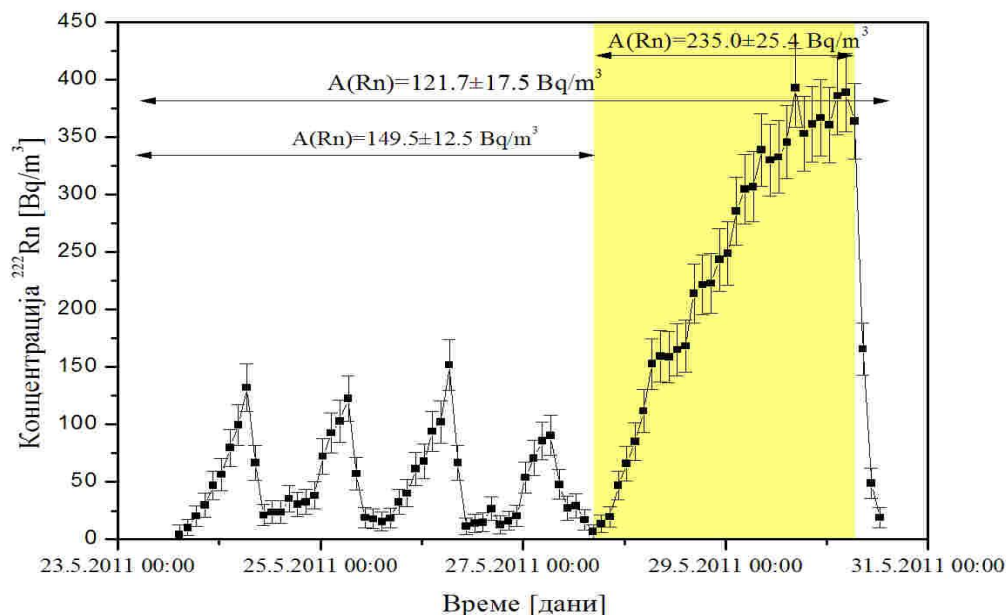
Слика 56. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Иво Андрић Центар)



Слика 57. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Бранислав НушићТоплице)



Слика 58. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Свети Сава Лаиш)



Слика 59. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Бранко Радичевић Старчевица)

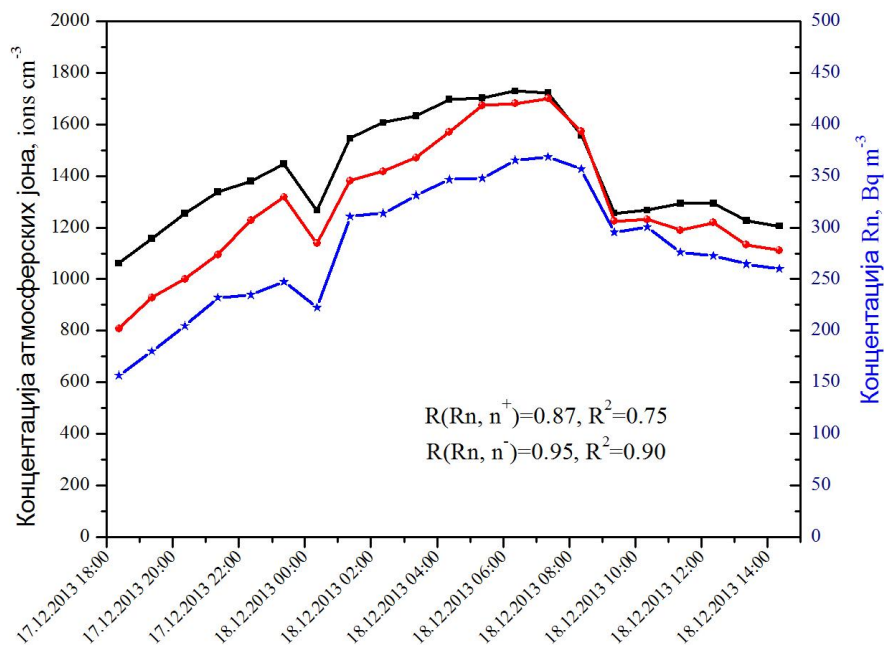
На сликама се могу видети изражени дневни пикови радона који се јављају у зору као последица два ефекта:

- температурне инверзије у приземним слојевима атмосфере. Ова појава спречава дифузију радона ка вишим слојевима атмосфере и чини да његова концентрација драстично расте (Vlaaiboer et al., 1996). Са појавом сунца и загревања површине земље долази до стварања температурног градијента и поновне дифузије ка вишим слојевима атмосфере. Као последица тога, око поднева се јављају дневни минимуми концентрације радона. Ова појава је везана за спољашњу средину, али се њен ефекат осећа и у затвореном простору (Kolarž, et al., 2009)
- крај радног дана и викенд подразумева мање отварање прозора и врата, а самим тим повећану акумулацију радона у затвореном простору, док почетак наставе подразумева отварање врата и прозора и снижавање концентрације радона чиме се ефекат изражених минимума и максимума појачава.

Ипак, ови ефекти нису увек изражени и видљиви (Слика 58). То може бити последица добре хидроизолације и заптивености објекта у односу на спољну средину са и без добре парне бране (хидроизолације која истовремено спречава продор радона у објекат) или неконтролисаних услова мерења (нпр. промаја на мерном месту).

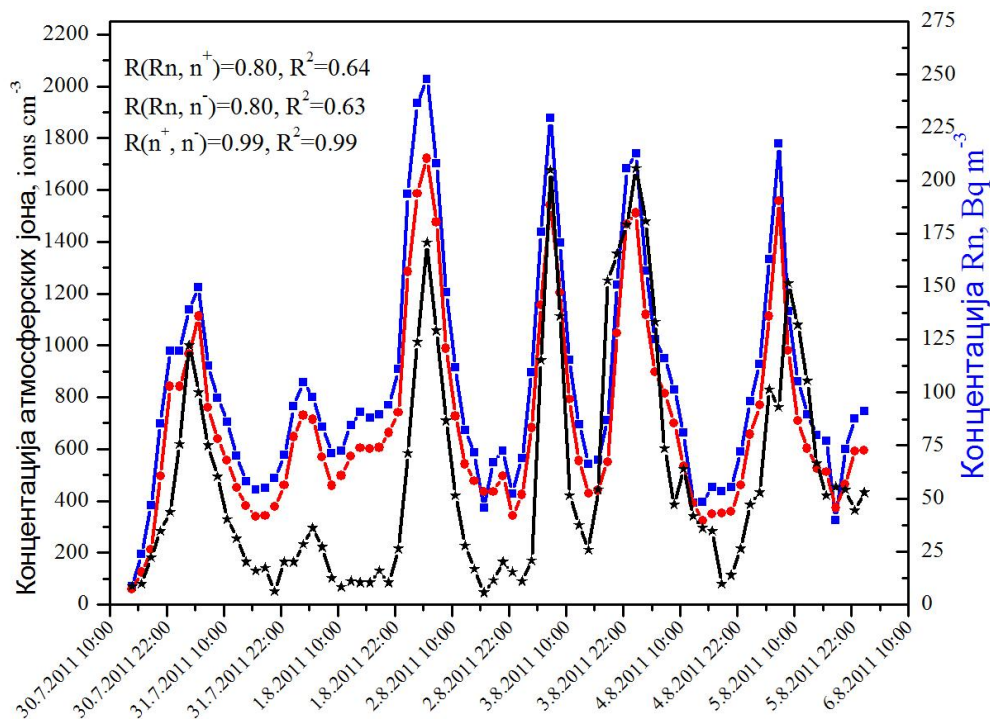
## 5.6. Концентрације јона и корелације са концентрацијом радона

На слици 60. су приказане промене концентрације јона и радона мерених један дан у ОШ. Бранислав Нушић Топлице и 7 дана у ОШ Змај Јова Јовановић Хисете. Инструменти за коришћени за ова мерења су: Rad 7 за концентрацију радона и CDIS за концентрацију јона. Инструменти су били подешени тако да се подаци усредњавају на сат времена, а CDIS је подешен тако да мери само групу кластер јона.



Слика 60. Дијаграм промене концентрације негативних (●) и позитивних (®) јона и радона (\*) у времену са коефицијентима корелације ( $R$ ) и детерминације ( $R^2$ ), мерених један дан у ОШ. Бранислав Нушић Топлице.

Корелациони коефицијенти концентрације јона и радона у обе школе приказују јаку позитивну корелацију ( $R$ ) између ове две мерене величине и висок коефицијент детерминације ( $R^2$ ). Измерни максимуми и минимуми су последица смера вертикалног градијента темепературе и из спољашње средине се дифузијом преносе у унутрашњу, тј. у затворен простор. Коефицијент униполарности ( $n^+/n^-$ ) је износио 1.1 у школи Бранислав Нушић и 1.2 у школи Јован Јовановић Змај што указује на низак коефицијент јон-аеросол припајања, тј. ниску концентрацију аеросола у просторијама где је мерено.



Слика 61. Дијаграм промене концентрације негативних (●) и позитивних (®) јона и радона (\*) у времену са коефицијентима корелације ( $R$ ) и детерминације ( $R^2$ ), мерених 7 дана у ОШ Змај Јова Јовановић Хисете.

Однос концентрације јона и радона у школи Јован Јовановић износио је  $14.6 \times 10^6$  јона/Bq за позитивне и  $11.6 \times 10^6$  јона/Bq за негативне јоне, док су у школи Бранислав Нушић те вредности износиле 10,1 и 9.5 јона/Bq респективно, што је у оквирима измереним у Kolarž et al. (2009).

## 6. ЗАКЉУЧЦИ

***Мерење концентрација радона са три групе детектора довела су до следећих закључака:***

Хипотеза да логаритми концентрација радона имају нормалну дистрибуцију потврђена је за све четири групе мерења ( $KS, p > 0,05$ ).

Поређењем резултата мерења за три групе детектора одређен је степен корелације концентрације  $^{222}\text{Rn}$  изражен преко Пирсоновог коефицијента детерминације ( $R^2$ ). Пирсонов коефицијент детерминације за све четири групе детектора има високе вредности и креће се у интервалу 0,87 – 0,91. Овај резултат је сасвим очекиван с обзиром на намену детектора.

***Мерење концентрација радона, торона и њихових краткоживећих потомака у школама Града Бања Луке доводи до закључака:***

Вредности концентрација  $^{222}\text{Rn}$  измерена у школама налази се у интервалу (25-549)  $\text{Bq/m}^3$ . Само у једној школи је измерена вредност већа од 400  $\text{Bq/m}^3$ .

Анализа података показала је да се концентрација радона у школама статистички значајно не разликује у просторијама у приземљу од просторија на првом спрату ( $B, p = 0,026$  MW,  $p = 0,032$ ). Било је очекивати да су концентрације на спрату веће.

Анализа резултата је показала да се концентрације радона статистички значајно не разликују ( $B, p = 0,184$  LSD у просторијама школе у којима је вршено мерење: зборница-ходник ( $p = 0,279$ ); зборница-канцаларија ( $p = 0,977$ ), ходник-канцаларија ( $p = 0,235$ )).

Анализа резултата је показала да постоје разлике између објеката (школа) грађених од различитих грађевинских материјала ( $B, p = 0,031$ ). Измерене су ниже вредности концентрације радона у објектима направљених од металних панела у односу на објекте направљене од ситене опеке и опеке (MW,  $p = 0,022$ ) канцаларија ( $p = 0,235$ )).

У 25 школа измерене концентрације  $^{220}\text{Rn}$  (торон) су мање од 200  $\text{Bq/m}^3$ , са највећом фреквенцијом до 100  $\text{Bq/m}^3$ . Максимална концентрација измерена је у школи Бранислав Нушић Топлице која износи 198  $\text{Bq/m}^3$ . Могућ разог за високу вредност торона је близина геотермалне бање. Постоји разлика између мерених концентрацијама торона у приземљу и на првом спрату (LSD,  $p = 0,01$ ). Разлика између концентрација торона у различитим просторијама (LSD,  $p = 0,274$ ) није изражена.



Однос концентрације торона и радона ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) у школама Бања Луке је у интервалу од 0,121 до 2,083; исто тако има лог-нормалну дистрибуцију. Аритметичка средња вредност односа:  $C_{Tn}/C_{Rn}$  је једнака на 0,821 ( $SD=0,521$ ), а геометријска средња вредност: 0,663 ( $ГСД=2,032$ ). Анализа кумулативне фреквенције резулата је показала да у 11 случајева однос ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) већи од 0,8

Однос између  $EETC$  и  $EERC$ : ( $EETC/EERC$ ) је израчунат и добијене вредности су у интервалу од 0,008 до 0,118 са геометријском средњом вредности од 0,036 ( $ГСД=2,22$ ).

**Мерење концентрација радона, торона и њихових продуката распада у кућама Града Бања Луке доводи до закључака:**

Концентрације радона  $C_{Rn}(av)$  у свих 81 кући су биле у интервалу од 22 до 1773  $Bq/m^3$ . Концентрација радона у 74 кући је била мања од 200  $Bq/m^3$ . Концентрације радона веће од 400  $Bq/m^3$  су измерене у 3 куће. Један објекат је показао високу концентрацију радона а могућ разлог је да се налази на зони фрактуре.

Измерена концентрација  $^{220}Rn$  у 19 кућа је у интервалу (2-77)  $Bq/m^3$  са геометријском средњом вредности од 26  $Bq/m^3$  ( $ГСД=2,51$ ). Ови резултати су мањи у односу на резултате у школама.

Корелација између торона и радона у кућама је постојала само у 4 случаја са коефицијентима корелације у интервалу од 0,112-0,304). Анализа кумулативне фреквенције резулата показала да је у 31,5 % случајева однос ( $C_{Tn}/C_{Rn}$ ) већи од 0,8.

Измерене вредности односа између  $EETC$  и  $EERC$  ( $EETC/EERC$ ) за куће налази се у интервалу (0,007-0,16) са геометријском средњом вредности од 0,039 ( $ГСД=2,02$ ). Утицај спрата на концентрације продуката распада радона  $EERC$  и торона  $EETC$  исто тако статистички није значајна, ( $EERC$ : АНОВА,  $p=0,297$  и  $EETC$ : АНОВА,  $p=0,222$ ).

**Мерење концентрација радона, торона и њихових продуката распада у школама и кућама Града Бања Луке доводи до следећих закључака:**

Из ових разматрања се види да су активности веће у школама него у кућама. Разлози за то могу бити: врста грађевинског материјала, начин градње објеката и старост објеката.

Анализа је показала да постоји статистички значајна разлика међу мереним концентрацијама у школама и кућама за концентрацију торона ( $KW$ ,  $p=0,006$ ) и  $EERC$  ( $KW$ ,  $p=0,002$ ; док разлике у концентрацијама радона ( $KW$ ,  $p=0,061$ ) и  $EETC$  ( $KW$ ,  $p=0,537$ ) низу биле статистички значајне. Примењујући АНОВА параметарску анализу,

добити су исти резултати о значају разлика: Rn: АНОВА,  $p=0,116$ ; Tn: АНОВА,  $p=0,01$ ; EERC: АНОВА,  $p=0,001$ ; EETC: АНОВА,  $p=0,62$ .

Геометријска средња вредност ефективне годишње дозе коју прима становништво Града Бања Луке од радона и распадних производа радона износи  $0,67 \text{ mSv/god}$ . Док је годишња доза коју прими становништво светском нивоу од свих извора зрачења  $2,4 \text{ mSv/god}$  (UNSCEAR, 2000).

***Мерење концентрација радона, у школама Града Бања Луке, активном методом доводи до закључака:***

Процењена средња седмична концентрација  $^{222}\text{Rn}$  налази се у интервалу (28-415)  $\text{Bq/m}^3$  (АС =  $99 \text{ Bq/m}^3$ , СД =  $100 \text{ Bq/m}^3$ ). Анализа је показала да у 20 % третираних школа просечна седмична концентрација  $^{222}\text{Rn}$  има вредност око  $150 \text{ Bq/m}^3$  или су оне више од назначене вредности.

Процењена средња петодневна концентрација  $^{222}\text{Rn}$  налази се у интервалу (32-325)  $\text{Bq/m}^3$  (АС =  $91 \text{ Bq/m}^3$ , СД =  $72 \text{ Bq/m}^3$ ). Анализа је показала да у 16 % третираних школа просечна петодневна концентрација износи преко  $150 [\text{Bq/m}^3]$ .

Процењена средња дводневна (викенд) концентрација  $^{222}\text{Rn}$  налази се у интервалу (32-639)  $\text{Bq/m}^3$  (АС =  $116 \text{ Bq/m}^3$ , СД =  $153 \text{ Bq/m}^3$ ). Анализа је показала да у 20 % третираних школа просечна дводневна концентрација износи око  $150 [\text{Bq/m}^3]$  или је виша.

Хипотеза да логаритми концентрације радона имају нормалну дистрибуцију је потврђена за све три групе мерења (KS,  $p>0,05$ ).

***Мерење концентрација радона, у школама Града Бања Луке, активном и пасивном методом доводи до закључака:***

Од укупно 25 измерених локација са обе методе у 23 случаја концентрација  $^{222}\text{Rn}$  је била мања од  $200 \text{ Bq/m}^3$ , док је већа од  $200 \text{ Bq/m}^3$  била регистрована само у два случаја. Највећа фреквенција резултата мерења је у интервалу до  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Највиша вредност измерена је у школи Младен Стојановић (Б. Мајдан) чија просечна седмична вредност износи  $451 \text{ Bq/m}^3$ . Један од разлога повишене концентрације  $^{222}\text{Rn}$  је геологија тла, подручје је богато ископинама песка (мајдани), а концентрација  $^{222}\text{Rn}$  у песку износи  $(2\ 000 - 20\ 000) \text{ Bq/m}^3$ , други разлог је врста објекта (монтажни) који даје могућност уласка радона у просторије. Концентрација  $^{222}\text{Rn}$  у школи Иво Андрић (центар града) износи  $401 \text{ Bq/m}^3$ , јер у неким околним објектима постоји слична тенденција повишене

концентрације. Објашњење појаве повишене концентрације  $^{222}\text{Rn}$  на овом мјесту тражи додатну анализу и увођење санационих мера, јер у објекту бораве деца. Повишену концентрације  $^{222}\text{Rn}$  има школа Бранислав Нушић (Топлице) која износи  $157 \text{ Bq/m}^3$ , то је место богато термалним изворима који омогућавају брзо дифундовање  $^{222}\text{Rn}$  из унутрашњости земље. Школа Свети Сава (Лауш) има вишу просечну концентрацију  $^{222}\text{Rn}$  од осталих школа која износи  $154 \text{ Bq/m}^3$ . Један од могућих потенцијалних разлога је експлоатација угља у прошлости чиме су створени услови за акумулацију и дифундовање  $^{222}\text{Rn}$  на површину земље, јер је познато да остаци угља могу узроковати повишене концентрације  $^{222}\text{Rn}$ .

Степени корелације резултата концентрације  $^{222}\text{Rn}$  мерених активном методом (просечне седмичне концентрације) и пасивном методом  $\text{CRn}(3)$  детектори (просечна годишња концентрација), изражен преко Пирсоновог коефицијента детерминације ( $R^2$ ) износи 0,65. Поређење резултата пасивне и активне методе није понудио висок степен корелације.

Директно мерење радона и торона прате многи проблеми и све ове резултате треба посматрати критички.

Континуална мерење концентрација радона и атмосферских јона су показале јаке позитивне корелације потврђујући да је распад радона и његових краткоживећих потомака тј. емитовање  $\alpha$  честица, главни генератор промене концентрације атмосферских јона у животној средини.

**Генерални закључак је да ово подручје нема јако изражен геогени радонски потенцијал, али се појављују геогене тачке које показују значајне концентрације  $^{222}\text{Rn}$ . Процењена вредност  $^{220}\text{Rn}$  из материјала од којих су саграђени испитивани објекти показују висок степен геогеног потенцијала.**

**Могућности за даљим истраживања радона на подручју Града Бањалуке и Републике Српске треба да воде ка изради Националне Радонске мапе Републике Српске.**

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- Amgarou, K.**, Font LI, Baixeras C. A novel approach for long-term determination of indoor  $^{222}\text{Rn}$  progeny equilibrium faktor using nuclear track detectors. Nucl Instrum Meth Phys Res A 506:186-198; 2003.
- Antović, N**, Vukotić P, Zekić R, Svrkota R. and Ilčić R. Indoor radon concentrations in urban settlements on the Montenegrin Coast. Radiat. Meas. 42, 1573–1579. 2007.
- Arnstein, A.**, Sozialyigianische Untersuchunge Uber die Berglente in den Schneeberger Kobaltgruben. Wien. Arbeit Geb. Soz. Med. 5, p: 64-83. 1913.
- Baggenstos M**, J.F.Vailley, W.Zeller. Federal Office of Public Health, 1999.
- Bale, W.F.**, Memorandum to the files, March 14, 1951: Hazards Associated with Radon and Thoron. Health Physics 38, p: 1062-1066. 1980
- Barillon R.**, Fromm M., Chambaudet A., Marah H, Sabir A. Track Etch Velocity in a Radon Detector (LR115, Cellulose Nitrate). Radiat. Meas. 28 (1-6), 619-628, 1997.
- Barooah D.**, Laskar I., Goswami A.K., Ramachandran T.V., Nambi K.S.V. Estimation of indoor radon, thoron and their progeny using twin cup dosimeters with solid-state nuclear track detectors in Digboi of Upper. Radiation Measurements, Volume 36, Issues 1–6, June 2003, Pages 461-463.
- Blaauboer, R.O.**, Smetsers, R.C.G.M., Outdoor concentrations of the equilibrium- equivalent decay products of  $^{222}\text{Rn}$  in the Netherlands and the effect of meteorological variables. Radiat. Prot. Dosim. 69, 7–18, 1996.
- Baugues, C. M.**, Effects of grain size on radon emanation and migration. MS Thesis, Univ. Akron, 82 pp, 1993.
- Carpentieri C.**, Zunić Z.S., Carelli V., Cordedda C., Ferrigno G., Veselinovic N., Bossew P., Tollefsen T., Čuknić O., Vojinović Z., Bochicchio F., Assessment of long-term radon concentration measurement precision in field conditions (Serbian schools) for a survey carried out by an international collaboration. Radiat. Prot. Dosim. 145(2–3), 305–311, 2011.
- Cotton, F.** Albert, Wilkinson, G., Murillo, C.A.. Advanced Inorganic Chemistry (6th ed.). New York: Wiley, ISBN 0471199575, 1999.
- Clements MI**, Wilkening MH. Atmospheric pressure effects on Rn-222 transport across the Earth's climate sites. Journal of Geophysical Research 79:5025, 1974.
- Clouvas, S.** Xanthos, Takoudis G, Indoor radon levels in Greek schools. J Environ Radioact. 102(9):881-5, 2011.
- Ćurguz Z.**, Kolarž P., Žunić Z., Marinković B. i Predojević B. The application of the active method of measuring indoor radon concentration in the schools of Banja Luka, a city in The Republic of Srpska, Proc. XXVI Symp. of The Soc. Radiat. Protection of Serbia and Montenegro, Tara, Serbia, Book of Contributed Papers, Ed. Olivera Ciraj-Bjelac, pp.164-168. ISBN: 978-86-7306-105-4, October 2011.

**Ćurguz Z., Žunić Z.S., Tollefsen T., Jovanović P., Nikezić D., Kolarž P.** Active and passive radon concentration measurements and first-step mapping in schools of Banja Luka, Republic of Srpska, Rom. Journ. Phys., Vol. 58, Supplement, P. S90–S98, Bucharest, 2013

**Ditlov V.** Calculated tracks in plastics and crystals. Radiat. Meas. 25, 89–94, 1995.

**Dongarra G., Martinelli G.,** Migration processes of radon towards the earth surface: implication for the prediction of seismic and volcanic events, Sci. Meeting on Seismic Protection, Venice, PP 141 – 147, 1993.

**De Meijer, R.J., Stoop, P. and Put, L.** "Contribution of radon flows and radon sources to the radon concentration in a dwelling", Radiat. Prot. Dosim. 45(1-4) Supplement, 439-442, 1992.

**Durrani, S.A. i Bull, R.K.,** Solid state nuclear detection: Principles, methods and applications. Book ISBN 0080206050 Volume 111, st.1 1987.

**Durani, S., Bull, R.K.,** Solid State Nuclear Track Detection: Principles and Applications. Pergamon Press, Oxford, 1987.

**Durrani S.A. and Ilić.,** Radon Measurements by Etched Track Detectors, Applications in radon Protection, Earth Science and the Environment, World Scientific Publishing, Singapore, 1997.

**Durrige Company Inc.,** RAD 7 radon Detector. Owner's Manual, Bedford, 2000.

**Eisenbud M.,** Environmental Radioactivity, Third edition, Academic Press, San Diego, 1987

**Fews A.P., Henshaw D.L.** Application of solid state nuclear track detectors to measurement of natural alpha-radioactivity in human body tissues. Nucl. Instrum. Methods 197 (1982) 517.

**Fleischer R.L., Pirce P.B., Walker R.M.,** Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications, University of California Press, Berkeley, 1975.

**Fleischer R.L., Hart H.R. Jr., Morigo Campero A.,** Radon emanation over an ore body: Search for long distance transport of radon, Nucl. Instr. Meth., 173, pp169-181, 1980.

**Fleischer R.L.,** Alpha recoil damage: relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides, Geochim. Cosmochim. Acta, 52, pp 1459 – 1466, 1988.

**Fleischer R.L.** Tracks to Innovation: Nuclear Tracks in Science and Technology, Springer, 1998.

**Fromm M., Meyer P., Chambaudet A.,** Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 107 (1996) 337.

**Gerdien, H.,** Demonstration eines Apparates zur Absoluten Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft, Phys. Z. 6, 800–1, 1905.

**Ghosh, A., Vidale, E., Sweet, J., Creager, K., Wech A.,** Tremor patches in Cascadia revealed by seismic array analysis, 2009.

**Gernich V.,** Long-term observation of the natural gamma background radiation, IRPA 1996, International Congress on Radiation Protection, Vienna, 1996.

**Gulan L., Milic G., Bossew P., Omori Y., Ishikawa T., Mishra R., Mayya Y.S., Stojanovska Z., Vučković B. and Žunić Z.S.** Field experience on indoor radon, thoron and their progenies with solid state detectors in a survey of Kosovo and Metohija, Radiation Protection Dosimetry 152 (1-3), 189 – 197, 2012,

**Gulan L.**, Bochicchio F., Carpentieri C., Milić G., Stajić J., Krstić D., Stojanovska Z., Nikezić D., Žunić Z.S. High annual radon concentration in dwellings and natural radioactivity content in nearby soil in some rural areas of Kosovo and Metohija (Balkan region). *Nuclear Technology and Radiation Protection* 05/2013; 28(1):60–67.

**Harrison, R.G.**, Carslaw, K.S., Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere. *Rev. of Geophys.* **41** (3), 1012, 2003.

**Henke P.R.**, Benton E., *Nucl. Instrum. Methods* 97 (1971) 483.

**Henshaw D.**, Manual Track Analysis System Ltd. TASL Ltd. 1992.

**Hõrrak, U.**, Air Ion Mobility Spectrum at a Rural Area, *PhD Thesis*, Tartu, 2001.

**Hõrrak, U.**, Salm, J., and Tammet, H.: Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions, *J. Geophys. Res.*, 105, 9291–9302, 2000.

**Hueper, W.C.**, Occupational and Environmental Cancers of the Respiratory Tract. New York: Springer-Verlag. 1966.

**Iacob O.**, Grecea K. Public exposure to radon and thoron progeny in Romania International Congress Series, Volume 1276, February 2005, Pages 373-374.

**International Commission on Radiological Protection (ICRP)**, Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers. *Annals of the ICRP*, Vol 6 N° 1 1981.

**International Organization for Standardization (ISO)**. Determination of the characteristic limits (decision threshold, Comparative analysis of radon 13 detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation: fundamentals and application. ISO 11929. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.

**Jacobi W.** Activity and potential  $\alpha$  energy of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  daughters in different air atmosphere. *Health Phys* 22:441-450; 1972.

**Jacobi, W.**, 1972. Activity and potential  $\alpha$  energy of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  daughters in different air atmosphere. *Health Phys.* 22, 441–450 (1972).

**Janik M**, Tokonami S, Kovács T et al. International intercomparisons of integrating radon detectors in the NIRS radon chamber. *Appl Radiat Isot*; 67:1691–6, 2009.

**Janik M**, Tokonami S, Kranrod C et al. International intercomparisons of integrating radon/thoron detectors with the NIRS radon/thoron chambers. *Radiat Prot Dosim* 2010; 141:436–9.

**Janik M**, Tokonami S, Kranrod C, Sorimachi A, Ishikawa T, Hosoda M, McLaughlin J, Chang BU, Kim YJ. Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements. *J Radiat Res.* 2013 Jul 1;54(4):597-610. doi: 10.1093/jrr/rrs129. Epub 2013 Jan 7.

**Janik M.**, Tokonami S., Kranrod C., Sorimachi A., Ishikawa T., Hosoda M., McLaughlin J., Chang B.U., and Kim Y.J. Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements. *J Radiat Res.* 2013 July; 54(4): 597–610.

**Jonson G.**, Solid state nuclear track detectors in radon measurements indoors and in the soil, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 19, 335-338, 1991.

**Kima** Y.J., Leea H.Y., Kima C.S., Changa B.U., Rhoa B.H., Kimb C.K., Tokonamic S.. Indoor radon, thoron, and thoron daughter concentrations in Korea. International Congress Series Volume 1276, February 2005, Pages 46–49

**Kim** C.K., Kim, Y.J., Lee H.Y., Chang B.U., Tokonami S.,  $^{220}\text{Rn}$  and its progeny in dwellings of Korea. Radiat Meas 42, 1409-1414, 2007.

**Kofler**, M. Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Radiumemanation u Lbsungen und Gemischen. Phys. Z., 9 (1): 6-8, 1908.

**Kolarž**, P., Miljković, B., Čurguz Z., *Air-ion counter and mobility spectrometer*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 279, 219-222, doi: [279 \(2012\) 219–222](#), 2011.

**Kolarž**, P. M., Filipović, D. M., Marinković, B. P., Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations ” Applied Radiation and Isotopes, 67(11) 2062 – 2067, 2009.

**Kolarž**, P., Gaisberger, M., Madl, P., Hofmann, W., Ritter, M., and Hartl, A.: *Characterization of ions at Alpine waterfalls*, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 3687–3697, 2012, doi: 10.5194/acp-12-3687-2012.

**Kovacs** T. Thoron measurements in Hungary. Radiat Prot Dosimetry (2010) 141 (4): 328-334.

**Laakso**, L., Hirsikko, A., Grönholm, T., Kulmala, M., Luts, A., and Parts, T.-E.: Waterfalls as sources of small charged aerosol particles, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 6, 9297–9314, doi:10.5194/acpd-6-9297-2006, 2006.

**Lubin**, F.E., Wagoner, J.K., and Archer. Radon Daughter Exposure and Respiratory Cancer: Quantitative and Temporal Aspects. NIOSH-NIEHS Monogr. No 1. Washinton, D.C.: National Institute of Occupational Safety and Health-Nacional Institute of Environmental Sciences. 1971.

**Lubin**, F.E., Models for the Analysis of Radon-exposed population, Yale J.Biol, p:195-214, 1988.

**Lundin et al.**, Radon daughter exposure and respiratory cancer, quantitative and temporal aspects. Washington, D.C.: U.S. Public Health Service, Washington, D.C. 11. 1971.

**Malanca**, Fava R. and Gaidolfi L, Indoor radon levels in kindergartens and play-schools from the province of Parma, J. Environ. Radioact. 40(1), 1–10, 1998.

**Marsh** JW, Birchall A. Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny. Radiat Prot Dosim 87:167-178; 2000.

**Marsh** JW, Birchall A, Butterweck G, Dorrian M-D, Huet C, Ortega X, Reineking A, Tymen G, Schuler Ch, Vargas A, Vezzu G, Wendt J. Uncertainty analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure to radon progeny in the home. Radiat Prot Dosim 102:229-248; 2002.

**McLaughlin** J, Murray M, Currivan L, Pollard D, Smith V, Tokonami S, Sorimachi A, Janik M. Long-term measurements of thoron, its airborne progeny and radon in 205 dwellings in Ireland. Radiat Prot Dosimetry. 2011 May;145(2-3):189-93. doi: 10.1093/rpd/ncr067. Epub 2011 Apr 13.

**Mehra** R, Kansal S, Singh NP. Measurement of thoron and radon progeny in outdoors of Sirsa, India, using defined solid angle absolute beta counting. Radiat Prot Dosimetry. 2010 Oct;141(4):400-3. doi: 10.1093/rpd/ncq235. Epub 2010 Sep 22.

**Mercer** T. The effect of particle size on the escape of recoiling RaB atoms from particulate surfaces. *Health Phys* 31:173–174; 1976.

**Milić** G., Distribucija radona u vazduhu zatvorenog prostora u nekim regionima Kosova i Metohije, doktorska disertacija, Kosovska Mitrovica, 2003.

**Mishra**, Rosaline and Mayya, Y. S. Study of a deposition based Direct Thoron Progeny Sensor (DTPS) technique for estimating Equilibrium Equivalent Thoron Concentration (EETC) in indoor environment. *Radiat. Meas.* 43, 1408-1416, 2008.

**Mishra**, Rosaline and Mayya, Y. S. and Kushwaha, H.S. Measurement of  $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$  progeny deposition velocities on surfaces and their comparison with theoretical models. *Journal of Aerosol Sci.* 40, 1-15 2009.

**NCR**, National Research Council, Health Risk of Radon and Other Internally Deposited Alpha-emitters. BEIR VI. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Washington, D.C.: National Academy Press, 1988.

**NCRP** Report No. 44 exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters, 1984.

**NCRP** Report No 58 Second Edition A Handbook of Radioactivity Measurement Procedures Pub: NCRP Publications, 7910 Woodmont Avenue, Bethesda. Maryland, USA September 12, 1984 *J Label Compd Radiopharm*, 23: 113. doi: 10.1002/jlcr.2580230115 ", 1986.

**Németh** C., Tokonami S., Ishikawa T., Takahashi H., Zhuo W., Shimo M. Measurements of radon, thoron and their progeny in a dwelling in Gifu prefecture, Japan. *International Congress Series*, Volume 1276, February 2005, Pages 283-284.

**Nero**, A., "Radon and its decay products in indoor air: An Overview," in *Radon and its decay products in indoor air*. John Wiley & Sons, New York, NY, 1988.

**Nero**, A. Earth, air, radon and home. *Physics Today*, 42, pp. 32–39, 1989.

**Neznal** M., Matolín M., Just G., Turek K., Short-term Temporal Variations of Soil Gas Radon Concentration and Comparison of Measurement Techniques. *Rad. Prot. Dosim.* 108, 55-63, 2004

**Nikezić**, D. and Stevanović, N., 2004. Room model with three modal distributions of attached radon progeny, *Health Phys.* 87(4):000–000; 2004

**Nikezić** D., Kostić D. Simulation of the track growth and determining the track parameters. *Radiat. Meas.* 28 (1997) 185.

**Nikezić** D. Three dimensional analytical determination of the track parameters, *Radiat. Meas.* 32 (2000) 277–282].

**Nikezić** D. Yu K.N. Three-dimensional analytical determination of the track parameters. Over-etched tracks, *Radiat. Meas.* 37 (2003) 39-45;

**Nikezić** D., Yu K.N. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Material Science and Engineering* R46, 51-123, 2004.

**Nikezić** D. Yu K.N., Computer program TRACK\_TEST for calculating and plotting profiles for etch pits in nuclear track materials. *Computer Physics Communications* (2006) 174: 160 - 165



**Nikezić D. Yu K.N.**, Analyses of light scattered from etched alpha-particle tracks in PADC. Radiation Measurements (2008a) 43: 1417 - 1422

**Nikezić D. Yu K.N.**, Computer program TRACK\_VISION for simulating optical appearance of etched tracks in CR – 39 nuclear track detectors. Computer Physics Communications (2008b) 178: 591 - 595

**Nazaroff W.W.**, Nero A.V., Jonh Wiley & Sons "Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry," in Radon and Its Decay Products in Indoor Air 1988.

**O'Connor P.J.**, Gallangeher V., Madden J.S., Assessment of the geological factors influencing the occurrence of radon hazard areas in a carstic region, Geological Survey of Ireland, Report Series RS93/2, 1993.

**Owczarski, P.C.**, Holford, D.J., Freeman, H.D. and Gee, G.W. Effects of changing water content and atmospheric pressure on radon flux from surfaces of five soil types. Geophysical Research Letters 17: doi: 10.1029/GL017i006p00817. issn: 0094-8276, 1990.

**Papaefthymiou H**, Georgiou CD. Indoor radon levels in primary schools of Patras, Greece. Radiat Prot Dosimetry. 2007;124(2):172-6. Epub 2007 May 17.

**Paretzke G.H**, Benton E., Henke P.R. Nucl. Instrum. Methods 108 (1973) 73.

**Percov L.A.** Prirodni radioaktivnost biosferi, Atoizdat, Moskva, 1964.

**Planinić J**, Šmit G., Faj Y., Šuveljak B., Vuković B., Radolić V. Radon in schools and dwellings of Osijek. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Volume 191, Issue 1, pp 45-51, 1995.

**Pinault, J.L.**, Baubron, J.C. Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature data: A new approach for radon concentration modeling. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, Vol. 101, No. B2, 1996.

**Porstendorfer, J.**, Free – fractions, attachment rates, and plate-out rates of radon daughters in houses. Pp 285 – 300 in Radon and Its Decay Products: occurrence, Properties and Health Effects, P.K. Hopke. ed Symposium Series 331. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1987.

**Porstendorfer J**, Reineking A. Radon characteristics related to dose for different living places of the human. Proceed IRPA 10, T-9-1. Hiroshima: IRPA; 2000.

**Qiujia G.**, Boa C., Quanfub S. A pilot survey on indoor radon and thoron progeny in Yangjiang, China. International Congress Series Volume 1276, February 2005, Pages 313–314

**Radolić V.**, Vuković B., Stanić D., Katić M., Faj Z., Šuveljak B., Lukačević I., Faj D., Lukić M., Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 269, 87-90, 2006.

**Radosys**, Radosys Users Manual, 2008.

**Ramola R.C.** Levels of indoor radon, thoron, and their progeny in Himalaya International Congress Series, Volume 1276, February 2005, Pages 215-216

**Reist PC.** Aerosol science and technology. New York McGraw-Hill; 1993.

**Report No 15**, EUR 161 23 EN. Radon in indoor air. Report 93-10, SSI (Swedish Radiation Protection Institute), Stockholm (Sweden) 1993.

**Rostoski, O.**, Saup, E. and Schmorl, G.: Die Bergkrankheit der Erzbergleute in Schneeberg in Sacken (Schneeberger Lungenkrebs) Z. Krebsforsch 23. p:360-384. 1926.

**Samet, J.H.**, Radon and Lung Cancer, J. Natl.Cancer Ins. 81, p: 745-757. 1989.

**Seltser, R.**, Lung cancer and uranium mining: A critique. Arch. Environ. Health 10: 923-935. 1965.

**Segovia, N.**, Seidel, J.L., Monnin, M.; Variations of radon in the soil induced by external factors. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1997.

**SELECTED POLLUTANTS-WHO** Guideline under air quality,ISBN:97 89 28 900 2134,eds 2010 World Health Organization and Regional Office for Europe "

**Somogyi G.** Development of etched nuclear tracks. Nuclear Instrum. Methods 173 (1980) 21.

**Somogyi G**, Szalay A.S.,The methods of identification are based on track characteristicsNucl. Instrum. Methods 109 (1973) 211

**Stevanovic N**, Nikezić D, Djordjevic A. The recoil factor of  $^{214}\text{Pb}$ . Accepted for publication in Journal of Aerosol Science 2004.

**Stojanovska Z**, Januseski J, Boev B and Ristova M,. Indoor exposure of population to radon in the FYR of Macedonia. Radiat. Prot. Dos. 148, 162–167, 2012.

**Stojanovska Z.**, Boev B., Ristova M., Zunić S.Z., Čurguz Z, Januseski J. ANNUAL AND SEASONAL VARIATIONS OF INDOOR RADON CONCENTRATION IN SKOPJE (REPUBLIC OF MACEDONIA). Proceeding of: The First International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research, Volume: pp (251-254) 04/2012;

**Stojanovska Z.**, Bossew P., Tokonami S., Zunić S.Z., Bochicchio F., Boev B., Ristova M., and Januseski J. (2013): National survey of indoor thoron concentration in FYR of Macedonia (continental Europe – Balkan region). Radiat. Meas. 49, 57 – 66.

**Sugino K.**, Hempel CM., Miller MN, Hattox AM., Shapiro P., Wu C., Huang ZJ., Nelson SB. Molecular taxonomy of major neuronal classes in the adult mouse forebrain. Nat Neurosci 9:99-107, 2005.

**Swedjemark G.A.**, *The Equilibrium Factor F*. Health Physics Vol. 45, N° 2, Special Issue on Indoor Radon, p:453-462, 1983.

**Synnott H**, Hanley O, Fenton D, Colgan PA. Radon in Irish schools: the results of a national survey. J Radiol Prot.;26(1):85-96. Epub 2006 Mar 7, 2006.

**Šutej T.**, Ilić R., Najžer M., Nucl.Tracks Radiat. Mesa. 15(1988) 547.

**Tanner A.B.**, Radon migration in the ground: A supplementary review, In the Natural Radiation Environment III, National Technical Information service, Springfield,VA.CONF-780422,PP5-56, 1980.

**Thomas D.M.**, Koyanagi R.Y., The association between ground gas radon concentrations and seismic nad volcanic activity at Kilauea volcano, Eos tran.Am.Geophys.Un.67, pp905,1986.

**Tokonami S**, Yang M, Sanada T. Contribution from thoron on the response of passive radon detectors. Health Phys;80:612–5, 2001.

**Tokonami S.**, Sun Q., Akiba S., Ishikawa T., Furukawa M., Zhuo W., Hou C., Zhang S., Narazaki Y., Yonehara H., Yamada Y. Natural radiation exposures for cave residents in China, Radioactivity in the Environment 7:560-566. DOI:10.1016/S1569-4860(04)07067-6.

**Tokonami S**, Takahashi H, Kobayashi Y, Up-to-date radon-thoron discriminative detector for a large scale survey. Rev Sci Instrum;76:113505–9, 2005.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):** Sources and Effects of Ionising Radiation, New York, 1977.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (NSCEAR)**, Ionizing radiation sources and biological effect. United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations, New York, 1982.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).** Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations, 1988.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).** Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations, New York, 1993.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR),** Sources and effects of ionizing radiation, Report to general Assembly, Vol. II, pp 2 – 9, 2000.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).** United Report to the General Assembly, with scientific annexes, 2006.

**United States Environmental Protection Agency (US EPA).** Radon measurement proficiency (RMP) program handbook. EPA 520/1-91-006. Office of Radiation Programs 1991.

**United States Environmental Protection Agency,** Air and Radiation. Indoor radon and radon decay measurement device protocols. EPA 402-R-92-004. EPA 1992.

**United States Environmental Protection Agency.** Protocols for radon and radon decay product measurements in homes. EPA 402-R-92-003. Office of Radiation and Indoor Air 1993.

**Vargas A**, Ortega X. Influence of environmental changes on integrating radon detectors: results of an intercomparison exercise. Radiat Prot Dosim;123:529–36, 2007

**Vaupotič J.** Radon in Kindergartens and Schools: A Review. Handbook of Radon: Properties, Applications and Health (Editors: Zachary Li and Christopher Feng). Nova publishers ISBN: 978-1-62100-369-4, 2012.

**Vaupotič J**, Sikovec M, Kobal I. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. Health Phys.;78(5):559-62, 2000.

**Vaupotič J.**, Kavasi N. Preliminary study of thoron and radon levels in various indoor environments in Slovenia. Radiation Protection Dosimetry 141(4), 383-385, 2010.

**Vaupotič J.**, Bezek M., Kávási N., Ishikawa, T., Yonehara, H. Tokonami, S. Radon and thoron doses in kindergartens and elementary schools. Radiation Protection Dosimetry;, Vol. 152 Issue 1-3, p 247, Nov 2012.

**Venoso G**, De Ciccio F., Flores B., Gialanella L., Pugliese M., Roca V., Sabbarese C., Radon concentrations in schools of the Neapolitan area, Radiation measurements 44(1), 127-130, 2009.

**Vuchkov D.**, Ivanova K., Stojanovska Z., Kunovska B., Badulin V. Radon measurement in schools and kindergartens (Kremikovtsi municipality, Bulgaria. Romanian Journal of Physics, 58 (S). S328-S335. ISSN 1221-146X, 2013.

**Yamada Y.**, Sun Q, Tokonami S, Akiba S, Zhuo W, Hou C, Zhang S, Ishikawa T, Furukawa M, Fukutsu K, Yonehara H. Radon-thoron discriminative measurements in Gansu Province, China, and their implication for dose estimates. J Toxicol Environ Health A. 69(7):723-34, Apr 2006.

**Yonehara H.**, Tokomani S., Zhuo W., Fukutsu K., Ishikawa T., Yamada Y.. Thoron and its decay products in living environments of Japan, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan, 2004.

**Yuong D.A.**, Nature, Nature 128,1958.

**Yuji, O.**,Text book for Training Course in Environmental Radioactivity Analysis and Measurement. JCAC, Tokyo, Japan, 2004.

**WHO** handbook on indoor radon- a public health perspective. World HealthOrganization, Geneve, 2009.

**Who** Handbook on Indoor Radon, A Public Health Perspective, World Health Organization, edited by Hajo Zeeb and Ferid Shannoun, ISBN 978 92 4 154 76 73 (NLM classification : WN 615)".

**Zeigler JF.** The stopping and range of ions in matter. Availableat [www.srim.org](http://www.srim.org); 2003.

**Zhuo W.**, Tokonami S, Yonehara H et al. A simple passive monitor for integrating measurements of indoor thoron concentrations. Rev Sci Instrum;73:2877–81, 2002.

**Zhuo, W.**, Tokonami, S., Yonehara, H., Yamada, Y., A newly designed alpha-track detector for discriminatively determining radon and thoron concentrations. NIRS in Review of Scientific Instruments, 73(8), 2877-2881, 2002.

**Zunić Z S.**, Yarmoshenko I V, Birovljev A, Bochicchio F, Quarto M, Obryk B, Paszkowski M, Celikovic I, Demajo A, Ujic P, Budzanowski M, Olko P, McLaughlin J P and Waligorsk M P R., Radon survey in the high natural radiation region of Niska Banja, Serbia J. Environ. Radioactiv. 92, 165–174, 2007.

**Zunić, Zora S.** and Carpentieri, Carmela and Stojanovska, Zdenka and Antignani, Sara and Veselinovic, Nenad and Tollefsen, Tore and Carelli, Vinicio and Cordedda, Carlo and Cuknic, Olivera and Filipović, Jelena and Bossew, Peter and Bochicchio, Francesco. Some results of a radon survey in 207 Serbian schools. Romanian Journal of Physics, 58 (S). S320-S327. ISSN 1221-146X, 2013.

## 8. PRILOZI

### ПРИЛОГ 1.

Табела 34: Распоред Cr-39 детектора - школе

Рб.	Назив школе	Локација	Број детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморска висина [m]
1.	Младен Стојановић	Мајдан	136 592	13.06.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.78656	16.93440	290
2.	Бранислав Нушић	Топлице	136 588	13.06.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.74715	17.15536	185
3.	Иво Андрић	Центар	134 299	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77363	17.18809	210
4.	Бранко Радичевић	Старчевица	134 297	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76557	17.20629	239
5.	Петар Петровић Његош	Мејдан	134 226	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76215	17.19406	215
6.	Иван Горан Ковачић	Буцак	136 640	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.79724	17.20660	195
7.	Вук Караџић	Борик	136 688	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76921	17.20488	211
8.	Милутин Бојић	Поткозарје	136 593	13.06.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.91583	17.06771	290
9.	Свети Сава	Лауш	136 590	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.77814	17.16782	240
10.	Ћирило и Методије	Пискавица	136 591	13.06.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.86735	16.97646	186
11.	Ђура Јакшић	Шарговац	136 647	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.81790	17.19757	218
12.	Станко Ракита	Врбања	134 296	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.75972	17.25103	211
13.	Бранко Ћопић	Борик	136 642	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77138	17.20234	206
14.	Јован Цвијић	Центар	134 292 134 295	13.06.2011	10.05.2012	ходник канцеларија	приземље	44.76594	17.18134	211
15.	Доситеј Обрадовић	Мејдан	134 300	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76213	17.18773	221
16.	Мирослав Антић	Бистрица	136 587	13.06.2011	11.05.2012	зборница	Спрат	44.81424	17.05130	236
17.	Милан Ракић	Карановац	136 637	13.06.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.69906	17.19525	169
18.	Војислав Илић	Крупа	136 645	13.06.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.61811	17.14614	212
19.	Георгије С. Раковски	Нова Варош	136 589 134 298	13.06.2011	10.05.2012	ходник канцеларија	приземље приземље	44.77927	17.19387	215

*Мерење и анализа концентрације радона пасивном и активном методом на подручју Града Бања Луке*

20.	Десанка Максимовић	Драгочај	136 586	13.06.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.85477	17.16112	167
21.	Змај. Ј. Јовановић	Хисете	134 291	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76215	17.18050	213
22.	ЈованДучић	Залужани	136 641	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.83570	17.21760	200
23.	Алекса Шантић	Малта	136 584	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.78592	17.20078	211
			136 585			канцеларија				
24.	Бора Станковић	Буцак	136 646	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.80520	17.2140	199
			136 644			канцеларија				
25.	Петар Кочић	Хан Кола	136 649	13.06.2011	11.05.2012	зборница	Спрат	44.69570	17.08430	526

---

Табела 35: Распоред Cr-39 детектора - куће

Рб.	Локација	Број детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморска висина [m]
1.	Малта	136708	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.782578	17.204820	160
2.	Н.Варош	136713	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.772805	17.192042	163
3.	Центар	136709	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.770738	17.188738	176
4.	Центар	136707	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.762856	17.187709	186
5.	Хисете	136714	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	Спрат	44.760301	17.189285	180
6.	Борик	136710	19.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.765835	17.213438	170
7.	Буџак	136736	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	Спрат	44.794509	17.218736	157
8.	Залужани	136737	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.832244	17.209600	180
9.	Залужани	136732	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	Приземље	44.832154	17.207141	170
10.	Буџак	136734	20.11.2011	20.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.793594	17.212669	156
11.	Малта	136773	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.782772	17.209417	157
12.	Лауш	136735	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.778811	17.168215	193
13.	Лауш	136739	20.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	Спрат	44.780148	17.168196	197
14.	Топлице	136738	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.743893	17.166233	180
15.	Топлице	136663	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.745175	17.164681	190
16.	Топлице	136660	20.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	Приземље	44.733536	17.160283	220
17.	Старчевица	136671	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.758051	17.212218	173
18.	Буџак	136673	20.11.2011	21.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.801129	17.216965	157
19.	Центар	136667	20.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.776506	17.186481	200
20.	Крупа	136675	28.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.610132	17.147985	187
21.	Крупа	136679	28.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.615912	17.147125	183

*Мерење и анализа концентрације радона пасивном и активном методом на подручју Града Бања Луке*

22.	Карановац	136680	28.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.691262	17.195010	175
23.	Старчевица	136676	28.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.762993	17.212289	160
24.	Хисете	136681	28.11.2011	29.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.761558	17.187373	172
25.	Центар	136678	28.11.2011	29.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.769656	17.212856	168
26.	Центар	136668	29.11.2011	29.12.2012	дневни боравак	Спрат	44.760617	17.185390	178
27.	Н.Варош	136712	14.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.774186	17.204228	175
28.	Поткозарје	136677	05.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.908754	17.069339	282
29.	Пискавица	136682	05.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.864412	16.980670	173
30.	Врбања	136687	05.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	Приземље	44.761699	17.250014	180
31.	Центар	136670	10.12.2011	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.773065	17.203460	174
32.	Драгочај	136683	19.12.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.849902	17.167913	167
33.	Шарговац	136689	19.12.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.814487	17.200361	172
34.	Б.Мајдан	136684	26.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.763829	16.939120	298
35.	Б.Мајдан	136685	26.12.2011	27.12.2012	спаваћа соба	спрат	44.767520	16.938294	298
36.	Б.Мајдан	136690	26.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.761802	16.934951	302
37.	Б.Мајдан	136686	26.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.758784	16.931171	288
38.	Мејдан	136672	25.12.2011	21.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.758010	17.199918	173
39.	Мејдан	136674	25.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.757334	17.199609	171
40.	Лауш	136669	26.11.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.779201	17.168163	270
41.	Центар	137845	13.07.2012	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.767149	17.201587	175
42.	Хан Кола	137819	24.04.2012	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.696470	17.085221	520
43.	Буџак	136643	19.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	спрат	44.793012	17.220324	158
44.	Б.Мајдан	137832	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.764025	16.937628	293
45.	Б.Мајдан	137833	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.759401	16.936000	290
46.	Б.Мајдан	137834	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.765210	16.931954	290
47.	Б.Мајдан	137836	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.765370	16.936975	293
48.	Б.Мајдан	137835	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.764788	16.936310	293



*Мерење и анализа концентрације радона пасивном и активном методом на подручју Града Бања Луке*

49.	Б.Мајдан	137829	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.760925	16.933210	288
50.	Б.Мајдан	137831	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.761040	16.933529	300
51.	Б.Мајдан	137830	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.757614	16.931175	288
52.	Б.Мајдан	137837	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.760889	16.935104	296
53.	Б.Мајдан	137828	20.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.759219	16.927475	289
54.	Старчевица	137818	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	приземље	44.751703	17.218143	205
55.	Старчевица	137804	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	приземље	44.750531	17.217551	173
56.	Старчевица	137792	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	спрат	44.757344	17.220153	196
57.	Старчевица	137787	24.05.2012	25.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.755185	17.210114	173
58.	Старчевица	137791	24.05.2012	25.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.755216	17.214359	171
59.	Старчевица	137789	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	приземље	44.759031	17.218461	170
60.	Старчевица	137786	24.05.2012	25.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.757363	17.212951	169
61.	Старчевица	137788	24.05.2012	25.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.758947	17.216325	168
62.	Старчевица	137785	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	спрат	44.763524	17.217893	190
63.	Старчевица	137784	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	спрат	44.758300	17.214106	166
64.	Старчевица	137790	24.05.2012	25.12.2012	дневни боравак	приземље	44.760693	17.211403	172
65.	Старчевица	137793	24.05.2012	25.12.2012	спаваћа соба	спрат	44.757752	17.209106	167
66.	Центар	137817	23.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.768912	17.191011	185
67.	Центар	137801	23.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.768367	17.191901	185
68.	Центар	137807	23.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.769273	17.192195	184
69.	Центар	137811	23.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.769314	17.192166	185
70.	Центар	137805	23.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.768118	17.192309	183
71.	Центар	137840	18.09.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.768912	17.191011	185
72.	Центар	137838	19.06.2012	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.771381	17.193009	164
73.	Центар	137842	19.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.769541	17.191279	173
74.	Центар	137847	19.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	спрат	44.768367	17.191901	185
75.	Паприковац	137843	19.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.780668	17.184161	237

76.	Паприковац	137841	19.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.779842	17.184349	241
77.	Паприковац	137846	19.06.2012	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.779814	17.184261	239
78.	Топлице	137876	28.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.731532	17.165590	184
79.	Топлице	137869	28.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.735784	17.163710	184
80.	Топлице	137870	28.06.2012	27.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.738862	17.162466	186
81.	Топлице	137872	28.06.2012	27.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.743550	17.173436	178
82.	Топлице	137961	28.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.745687	17.170349	180
83.	Топлице	137873	28.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.746910	17.166429	210
84.	Топлице	137871	28.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.735625	17.160379	200
85.	Топлице	137860	28.06.2012	27.12.2012	дневни боравак	приземље	44.744287	17.172517	179

Табела 36. Распоред гама 1 детектора - школе

Рб.	Назив школе	Локација	Број детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморска висина [m]
1.	Младен Стојановић	Мајдан	155470-8	18.04.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.78656	16.93440	290
2.	Бранислав Нушић	Топлице	373628-7 111714-2	18.04.2011	11.05.2012	зборница ходник	приземље приземље	44.74715	17.15536	185
3.	Иво Андрић	Центар	260737-2 503019-2	17.04.2011	10.05.2012	канцеларија учионица	приземље приземље	44.77363	17.18809	210
4.	Бранко Радичевић	Старчевица	126083-5 123408-7	17.04.2011	10.05.2012	ходник канцеларија	приземље приземље	44.76557	17.20629	239
5.	Петар Петровић Његош	Мејдан	334627-5 381337-5	18.04.2011	10.05.2012	зборница канцеларија	приземље приземље	44.76215	17.19406	215
6.	Иван Горан Ковачић	Буцак	244991-6 282751-7	17.04.2011	10.05.2012	ходник ходник	приземље приземље	44.79724	17.20660	195
7.	Вук Караџић	Борик	367340-0 320179-5	18.04.2011	10.05.2012	зборница ходник	приземље приземље	44.76921	17.20488	211
8.	Милутин Бојић	Поткозарје	350460-2 175575-0	17.04.2011	11.05.2012	канцеларија ходник	приземље приземље	44.91583	17.06771	290
9.	Свети Сава	Лауш	141246-9	18.04.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.77814	17.16782	240
10.	Ћирило и Методије	Пискавица	232889-6	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.86735	16.97646	186
11.	Ђура Јакшић	Шарговац	129506-2 324331-8	18.04.2011	10.05.2012	ходник канцеларија	приземље спрат	44.81790	17.19757	218
12.	Станко Ракита	Врбања	114561-4 205286-8	18.04.2011	10.05.2012	зборница канцеларија	приземље спрат	44.75972	17.25103	211
13.	Бранко Ћопић	Борик	224956-3	18.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77138	17.20234	206

*Мерење и анализа концентрације радона пасивном и активном методом на подручју Града Бања Луке*

			289743-7			канцеларија	спрат			
14.	Јован Цвијић	Центар	127606-2	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76594	17.18134	211
			350593-0			канцеларија	приземље			
15.	Доситеј Обрадовић	Мејдан	116020-9	17.04.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76213	17.18773	221
			223899-6			канцеларија	приземље			
16.	Мирослав Антић	Бистрица	383132-8	18.04.2011	11.05.2012	зборница	спрат	44.81424	17.05130	236
17.	Милан Ракић	Карановац	326201-0	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.69906	17.19525	169
			115724-7			канцеларија	спрат			
18.	Војислав Илић	Крупа	198832-8	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.61811	17.14614	212
			193184-9			канцеларија	спрат			
19.	Георгије С. Раковски	Нова	117381-4	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77927	17.19387	
		Варош	376785-2			канцеларија	приземље			215
20.	Десанка Максимовић	Драгочај	130713-1	13.06.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.85477	17.16112	167
21.	Змај. Ј. Јовановић	Хисете	303230-4	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76215	17.18050	213
			339497-0			ходник	приземље			
22.	ЈованДучић	Залужани	155143-1	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.83570	17.21760	200
			134835-8			канцеларија	спрат			
23.	Алекса Шантић	Малта	313427-7	13.06.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.78592	17.20078	211
			356241-0			канцеларија	приземље			
24.	Бора Станковић	Будак	208718-7	13.06.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.80520	17.2140	199
			327815-7			канцеларија	приземље			
25.	Петар Кочић	Хан Кола	233056-1	13.06.2011	11.05.2012	зборница	спрат	44.69570	17.08430	526

Табела 37. Распоред Cr -39 (радуе детектори)- школе

рб.	Назив школе	Локација	Број Детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморс ка висина [m]
1.	Младен Стојановић	Мајдан	T 88869-T 88867	18.04.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.78656	16.93440	290
2.	Бранислав Нушић	Топлице	T 88845-T 88844	18.04.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.74715	17.15536	185
3.	Иво Андрић	Центар	T 88861-T 88860	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77363	17.18809	210
4.	Бранко Радичевић	Старчевица	W 38932-W 38931	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76557	17.20629	239
5.	Петар Петровић Његош	Мејдан	T 88935-T 88934	18.04.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76215	17.19406	215
6.	Иван Горан Ковачић	Буџак	T 88847-T 88846	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.79724	17.20660	195
7.	Вук Караџић	Борик	W 38896-W 38895	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76921	17.20488	211
8.	Милутин Бојић	Поткозарје	T 88690-T 88689	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.91583	17.06771	290
9.	Свети Сава	Лауш	T 88671-T 88670	18.04.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.77814	17.16782	240
10.	Ћирило и Методије	Пискавица	T 88705-T 88704	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.86735	16.97646	186
11.	Ђура Јакшић	Шарговац	T 88895-T 88894	18.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.81790	17.19757	218
12.	Станко Ракита	Врбања	T 88854-T 88853	18.04.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.75972	17.25103	211
13.	Бранко Ћопић	Борик	T 88857-T 88855	18.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77138	17.20234	206
14.	Јован Цвијић	Центар	T 88866-T 88865	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76594	17.18134	211
15.	Доситеј Обрадовић	Мејдан	W 39001-W 39000	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76213	17.18773	221
16.	Мирослав Антић	Бистрица	T 88864-T 88863	18.04.2011	11.05.2012	зборница	спрат	44.81424	17.05130	236
17.	Милан Ракић	Карановац	T 88888-T 88879	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.69906	17.19525	169
18.	Војислав Илић	Крупа	T 88685-T 88684	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.61811	17.14614	212
19.	Георгије С. Раковски	Нова Варош	T 88864-T 88863	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77927	17.19387	215
20.	Десанка Максимовић	Драгочај	T 88918-T 88917	17.04.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.85477	17.16112	167

*Мерење и анализа концентрације радона пасивном и активном методом на подручју Града Бања Луке*

21.	Змај. Ј. Јовановић	Хисете	T 88852-T 88851	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76215	17.18050	213
22.	ЈованДучић	Залужани	T 88854-T 88853	17.04.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.83570	17.21760	200
23.	Алекса Шантић	Малта	W 38896-W 38895	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.78592	17.20078	211
24.	Бора Станковић	Буџак	W 38911-W 38910	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.80520	17.2140	199
25.	Петар Кочић	Хан Кола	T 88937-T 88936	18.04.2011	11.05.2012	зборница	спрат	44.69570	17.08430	526

Табела 38. Распоред Cr -39 (радуе детектори) - куће

Рб.	Локација	Број детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморска висина [m]
1.	Борик	W 38846 - W 38847	19.11.2011	28.12.20 12	спаваћа соба	сптат	44.765835	17.213438	170
2.	Буцак	W 38854 - W 38855	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.794509	17.218736	157
3.	Буцак	W 38888 - W 38889	20.11.2011	21.12.2012	дневни боравак	приземље	44.801129	17.216965	157
4.	Буцак	W 38917 - W 38919	20.11.2011	20.12.2012	дневни боравак	приземље	44.793594	17.212669	156
5.	Залужани	W 38891 - W 38892	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.832154	17.207141	170
6.	Лауш	W 38903 - W 38904	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.780148	17.168196	197
7.	Лауш	W 39028 - W 39029	20.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.778811	17.168215	193
8.	Малта	W 38995 - W 38997	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.782772	17.209417	157
9.	Малта	W 39017 - W 39018	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.782578	17.204820	160
10.	Н.Варош	W 38858 - W 38859	14.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.774186	17.204228	175
11.	Старчевица	W 38852 - W 38853	28.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.762993	17.212289	160
12.	Топлице	W 38850 - W 38851	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.745175	17.164681	190
13.	Топлице	W 39007 - W 39009	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.733536	17.160283	220
14.	Топлице	W 39023 - W 39024	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.743893	17.166233	180
15.	Хисете	W 38905 - W 38907	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.760301	17.189285	180
16.	Центар	W 38863 - W 38864	20.11.2011	21.12.2012	дневни боравак	приземље	44.772805	17.192042	172
17.	Центар	W 38870 - W 38871	20.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	сптат	44.776506	17.186481	200
18.	Центар	W 38879 - W 38880	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.770738	17.188738	176
19.	Центар	W 38908 - W 38909	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.762856	17.187709	186

Табела 39. Распоред LR 115 детектори (DRPS/DTPS) - школе

Рб.	Назив школе	Локација	Број детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморска висина [m]
1.	Младен Стојановић	Мајдан	429	07.11.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.78656	16.93440	290
2.	Бранислав Нушић	Топлице	103	15.11.2011	11.05.2012	зборница	приземље	44.74715	17.15536	185
3.	Иво Андрић	Центар	371	07.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77363	17.18809	210
4.	Бранко Радичевић	Старчевица	199	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76557	17.20629	239
5.	Петар Петровић Његош	Мејдан	440	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76215	17.19406	215
6.	Иван Горан Ковачић	Буцак	415	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.79724	17.20660	195
7.	Вук Караџић	Борик	436	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76921	17.20488	211
8.	Милутин Бојић	Поткозарје	348	07.11.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.91583	17.06771	290
9.	Свети Сава	Лауш	110	07.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.77814	17.16782	240
10.	Ћирило и Методије	Пискавица	291	07.11.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.86735	16.97646	186
11.	Ђура Јакшић	Шарговац	423	14.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.81790	17.19757	218
12.	Станко Ракита	Врбања	437	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.75972	17.25103	211
13.	Бранко Ћопић	Борик	427	14.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77138	17.20234	206
14.	Јован Цвијић	Центар	441	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76594	17.18134	211
15.	Доситеј Обрадовић	Мејдан	457	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.76213	17.18773	221
16.	Мирослав Антић	Бистрица	466	07.11.2011	11.05.2012	зборница	спрат	44.81424	17.05130	236
17.	Милан Ракић	Карановац	424	09.11.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.69906	17.19525	169
18.	Војислав Илић	Крупа	183	09.11.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.61811	17.14614	212
19.	Георгије С. Раковски	Нова Варош	187	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.77927	17.19387	215
20.	Десанка Максимовић	Драгочај	458	07.11.2011	11.05.2012	ходник	приземље	44.85477	17.16112	167
21.	Змај. Ј. Јовановић	Хисете	376	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.76215	17.18050	213
22.	Јован Дучић	Залужани	299	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.83570	17.21760	200
23.	Алекса Шантић	Малта	189	09.11.2011	10.05.2012	ходник	приземље	44.78592	17.20078	211
24.	Бора Станковић	Буцак	108	09.11.2011	10.05.2012	зборница	приземље	44.80520	17.2140	199



25.	Петар Кочић	Хан Кола	182	14.11.2011	11.05.2012	зборница	спрат	44.69570	17.08430	526
-----	-------------	----------	-----	------------	------------	----------	-------	----------	----------	-----

---

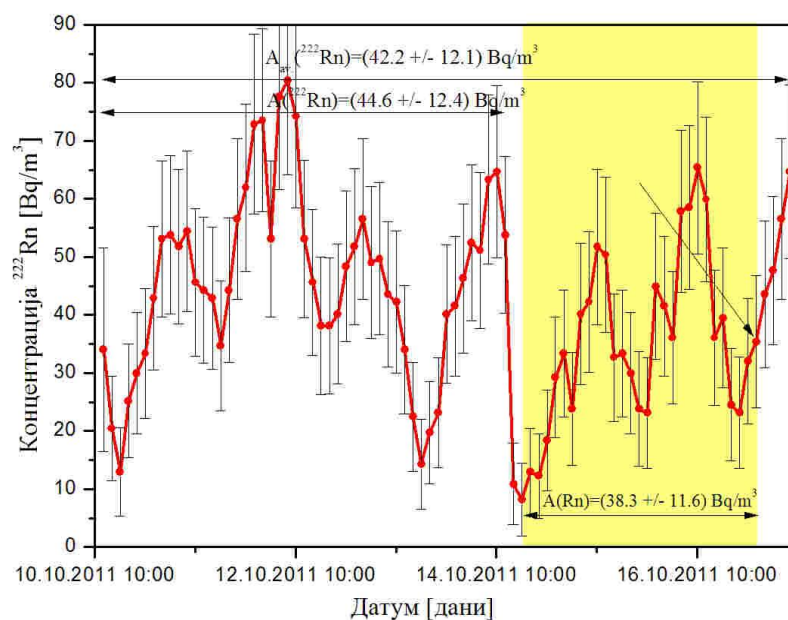
Табела 40. Распоред LR 115 детектори (DRPS/DTPS) - куће

Рб.	Локација	Број детектора	Време постав. детектора	Време скидања детектора	Врста просторије	Спратност објекта	ГПСН	ГПСЕ	Надморска висина [m]
1.	Малта	370	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.782578	17.204820	160
2.	Н.Варош	105	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.772805	17.192042	163
3.	Центар	193	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.770738	17.188738	176
4.	Центар	390	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.762856	17.187709	186
5.	Хисете	449	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	сптат	44.760301	17.189285	180
6.	Борик	453	19.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	сптат	44.765835	17.213438	170
7.	Буџак	398	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	сптат	44.794509	17.218736	157
8.	Залужани	363	19.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.832244	17.209600	180
9.	Залужани	164	19.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.832154	17.207141	170
10.	Буџак	439	20.11.2011	20.12.2012	дневни боравак	приземље	44.793594	17.212669	156
11.	Малта	357	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.782772	17.209417	157
12.	Лауш	117	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.778811	17.168215	193
13.	Лауш	368	20.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	сптат	44.780148	17.168196	197
14.	Топлице	360	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.743893	17.166233	180
15.	Топлице	172	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.745175	17.164681	190
16.	Топлице	173	20.11.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.733536	17.160283	220
17.	Старчевица	418	20.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	сптат	44.758051	17.212218	173
18.	Буџак	444	20.11.2011	21.12.2012	дневни боравак	приземље	44.801129	17.216965	157
19.	Центар	106	20.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	сптат	44.776506	17.186481	200
20.	Крупа	399	28.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.610132	17.147985	187
21.	Крупа	463	28.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	сптат	44.615912	17.147125	183
22.	Карановац	455	28.11.2011	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.691262	17.195010	175

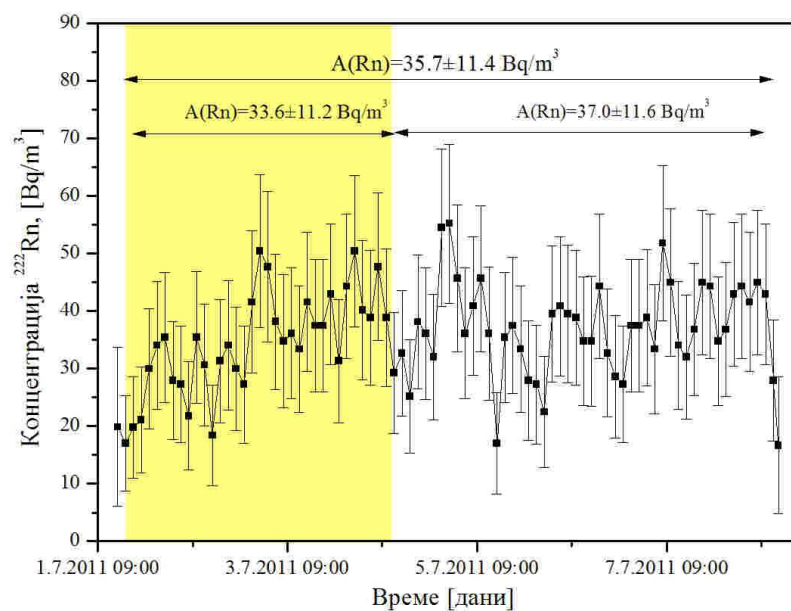
*Мерење и анализа концентрације радона пасивном и активном методом на подручју Града Бања Луке*

23.	Старчевица	111	28.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.762993	17.212289	160
24.	Хисете	433	28.11.2011	29.12.2012	дневни боравак	приземље	44.761558	17.187373	172
25.	Центар	355	28.11.2011	29.12.2012	дневни боравак	спрат	44.769656	17.212856	168
26.	Центар	353	29.11.2011	29.12.2012	дневни боравак	спрат	44.760617	17.185390	178
27.	Н.Варош	298	14.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.774186	17.204228	175
28.	Поткозарје	346	05.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.908754	17.069339	282
29.	Пискавица	462	05.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.864412	16.980670	173
30.	Врбања	364	05.11.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.761699	17.250014	180
31.	Центар	421	10.12.2011	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.773065	17.203460	174
32.	Драгочај	460	19.12.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.849902	17.167913	167
33.	Шарговац	412	19.12.2011	22.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.814487	17.200361	172
34.	Б.Мајдан	112	26.12.2011	27.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.763829	16.939120	298
35.	Б.Мајдан	451	26.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.767520	16.938294	298
36.	Б.Мајдан	180	26.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.761802	16.934951	302
37.	Б.Мајдан	190	26.12.2011	27.12.2012	спаваћа соба	спрат	44.758784	16.931171	288
38.	Мејдан	292	25.12.2011	21.12.2012	спаваћа соба	приземље	44.758010	17.199918	173
39.	Мејдан	400	25.12.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.757334	17.199609	171
40.	Лауш	186	26.11.2011	27.12.2012	дневни боравак	спрат	44.779201	17.168163	270
41.	Х.Кола	377	24.04.2012	28.12.2012	дневни боравак	приземље	44.696470	17.085221	520
42.	Мејдан	394	26.12.2011	22.12.2012	дневни боравак	приземље	44.755722	17.182891	174

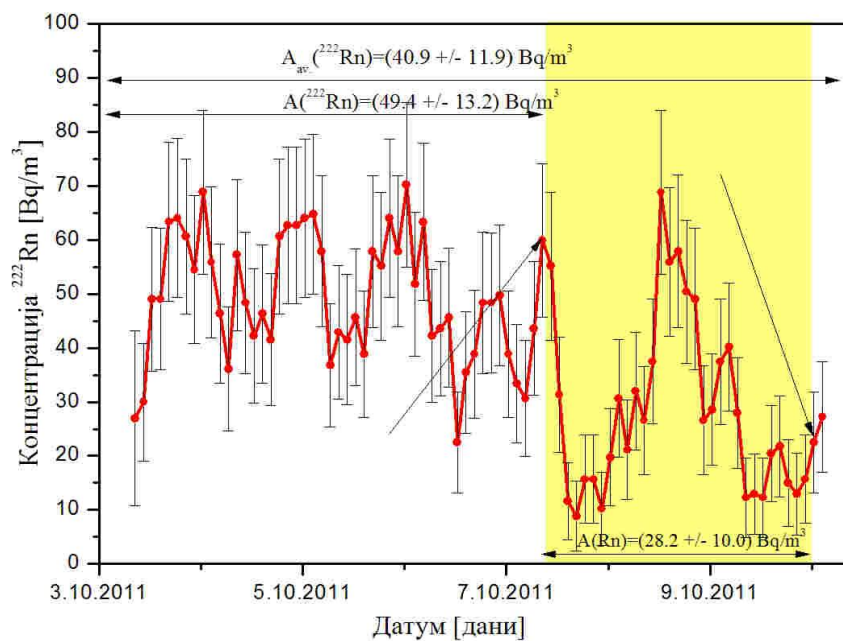
ПРИЛОГ 2.



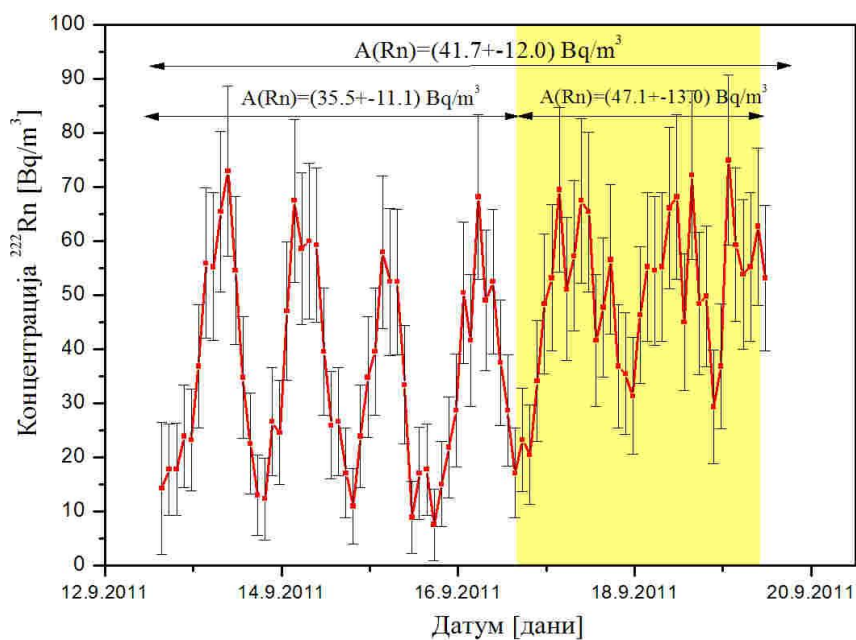
Слика 62. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Десанка Максимовић Драгочај)



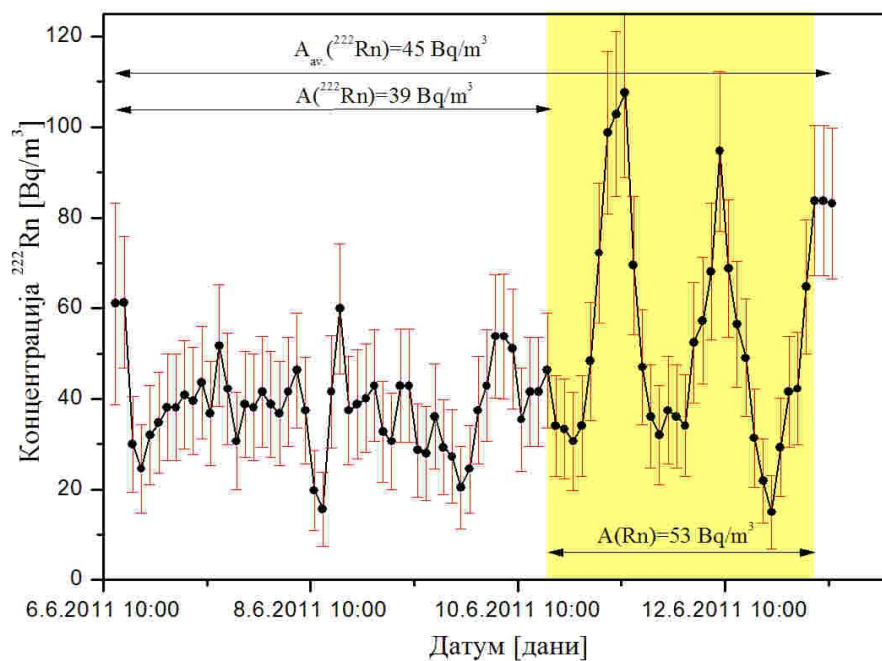
Слика 63. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Јован Цвијић Центар)



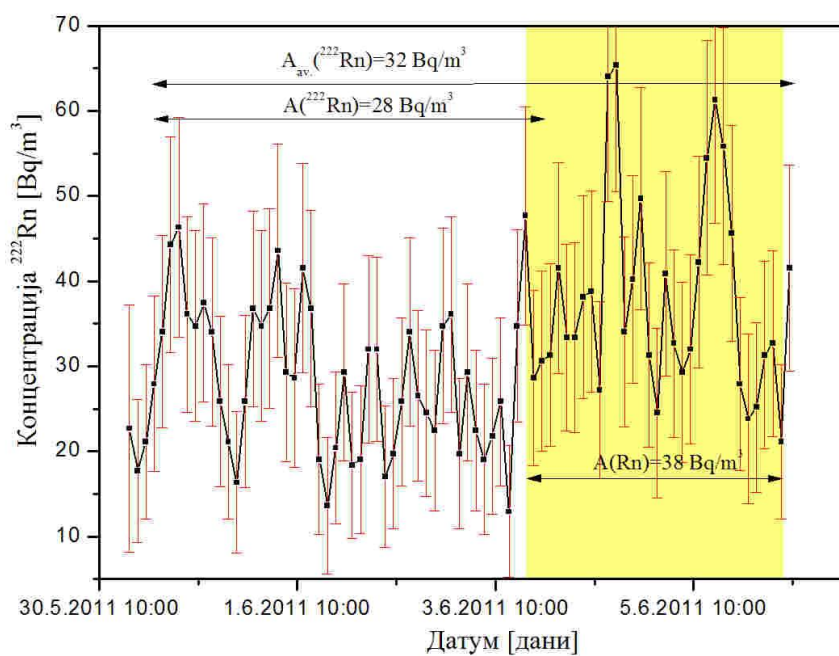
Слика 64. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Ђура Јакшић Шарговац)



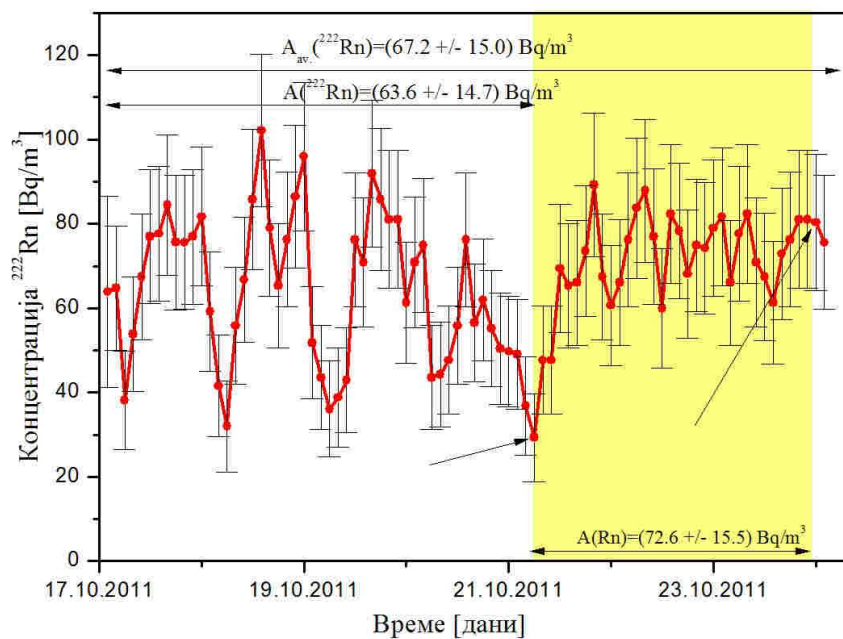
Слика 65. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Доситеј Обрадовић Мејдан)



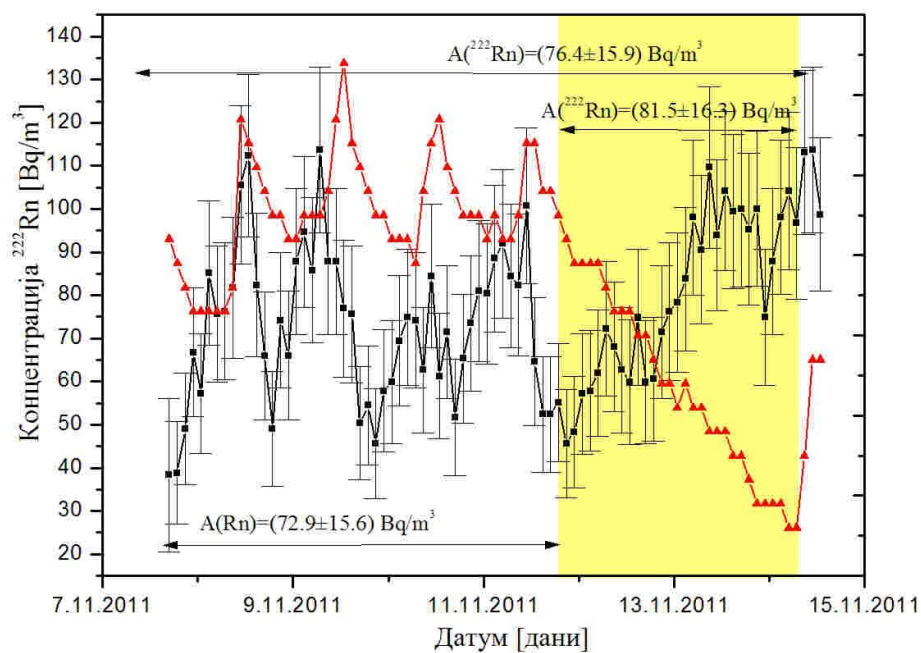
Слика 66. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Иван Горан Ковачић Буџак)



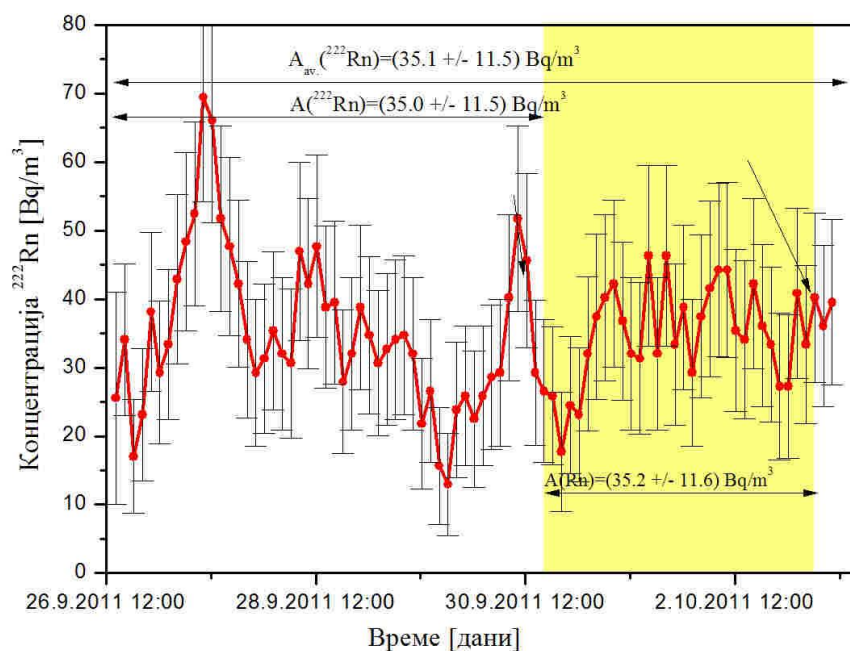
Слика 67. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Јован Дучић Залужани)



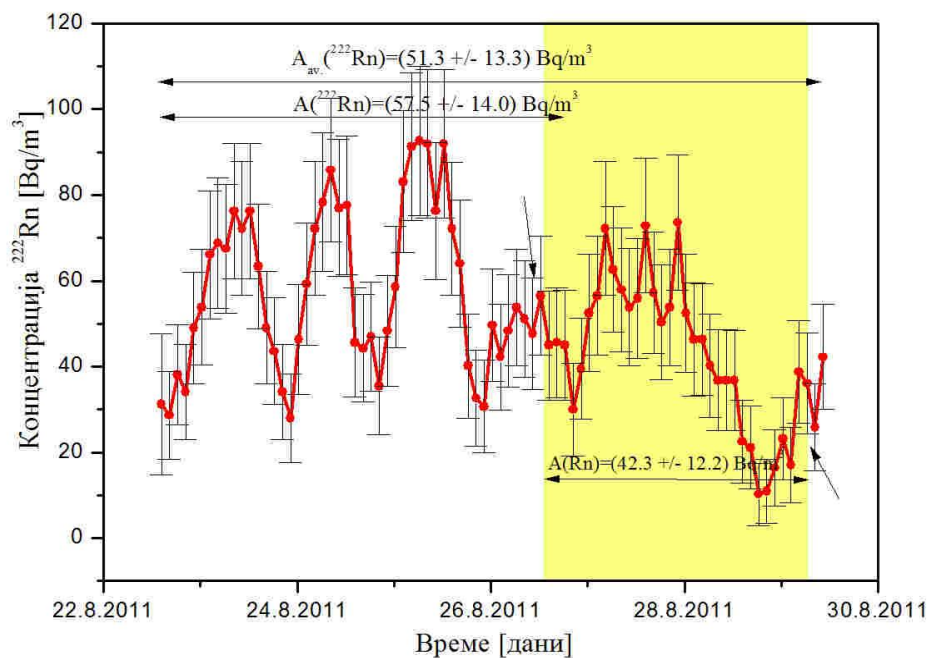
Слика 68. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Милутин Бојић Поткозарје)



Слика 69. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Мирослав Антић Бистрица)

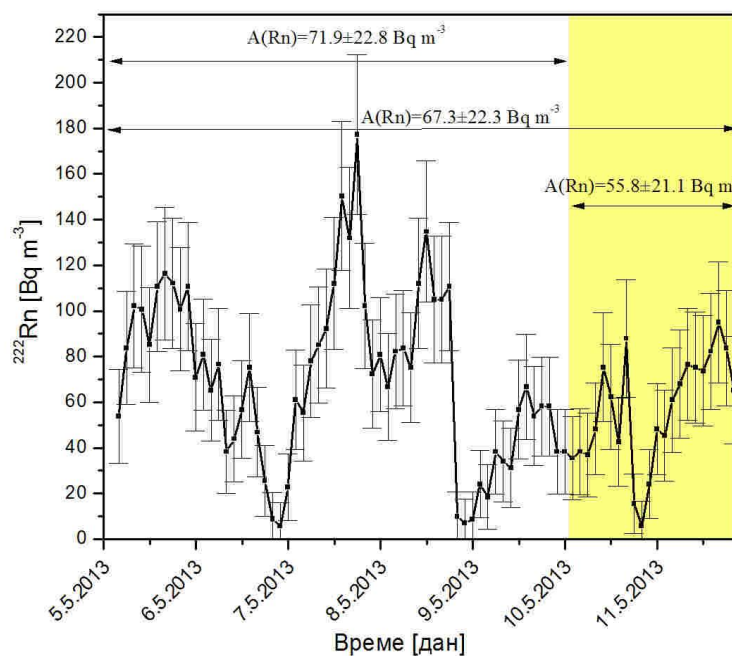


Слика 70. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Станко Ракита Врбања)

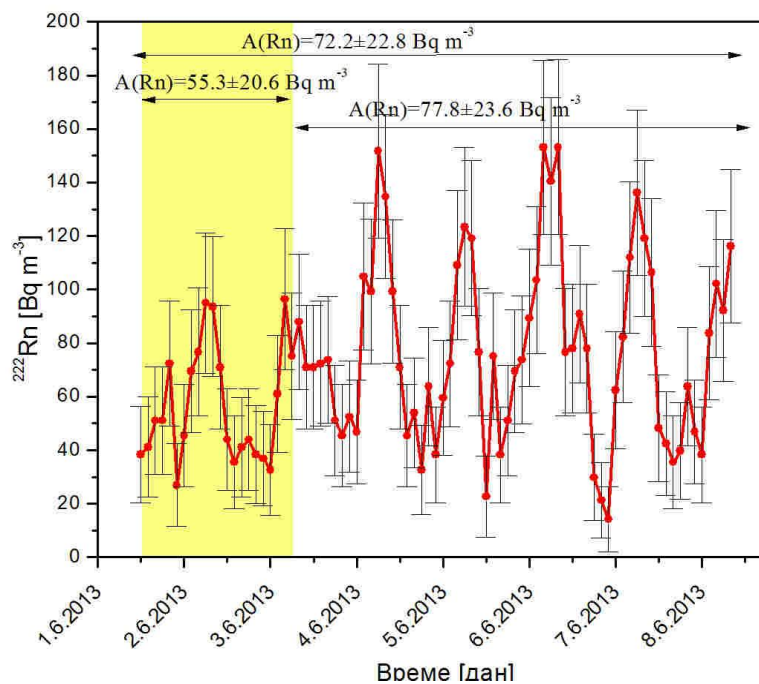


Слика 71. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Вук Караџић Борик)

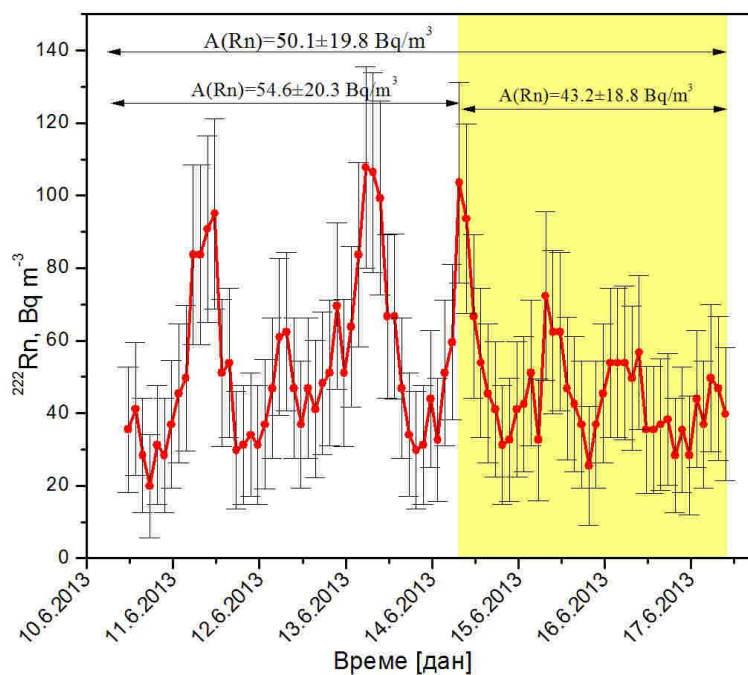




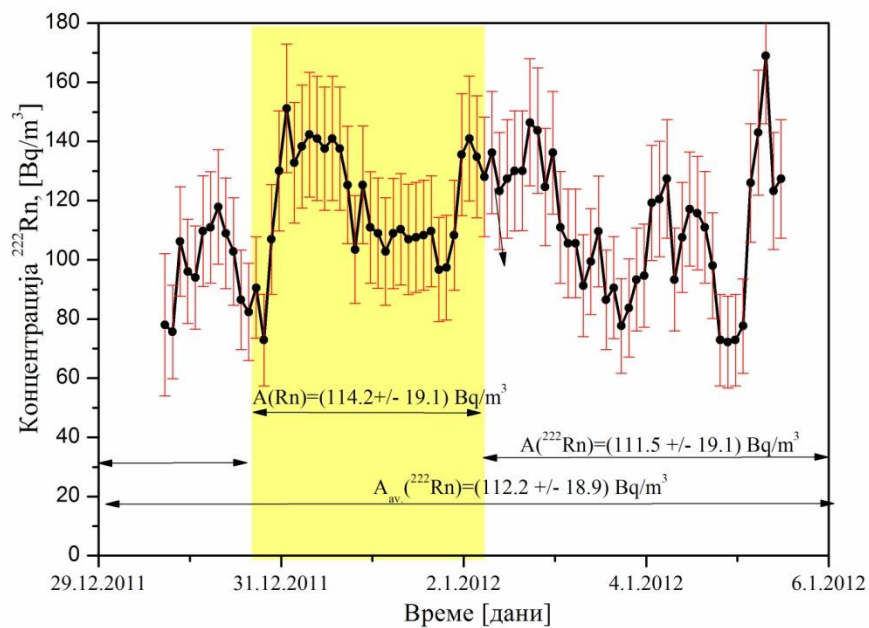
Слика 72. Дијаграм концентрација радона (О.Ш. Ђурило и Методије Пискавица)



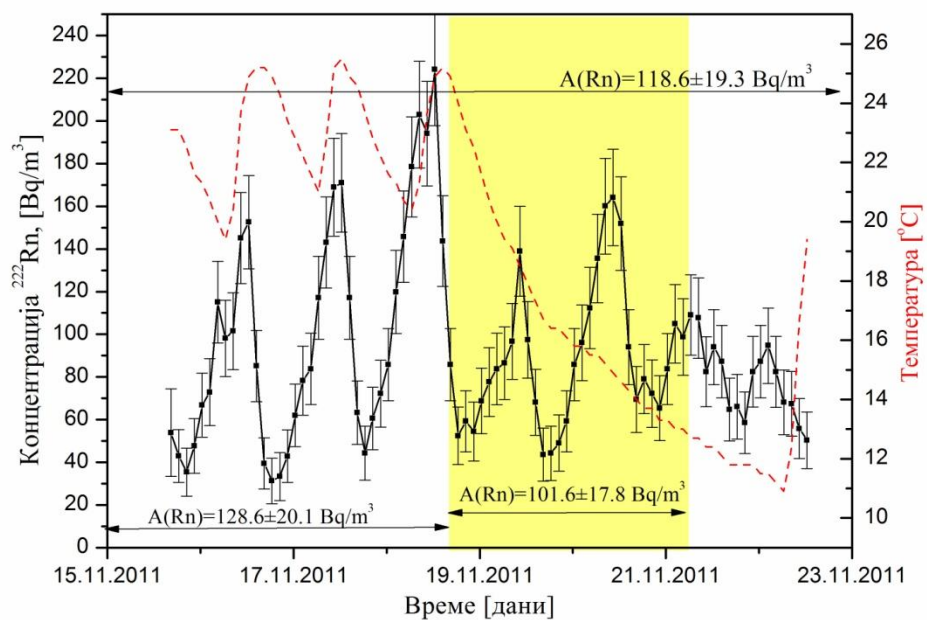
Слика 73. Дијаграм концентрација радона (О.Ш.Борислав Станковић Буџак)



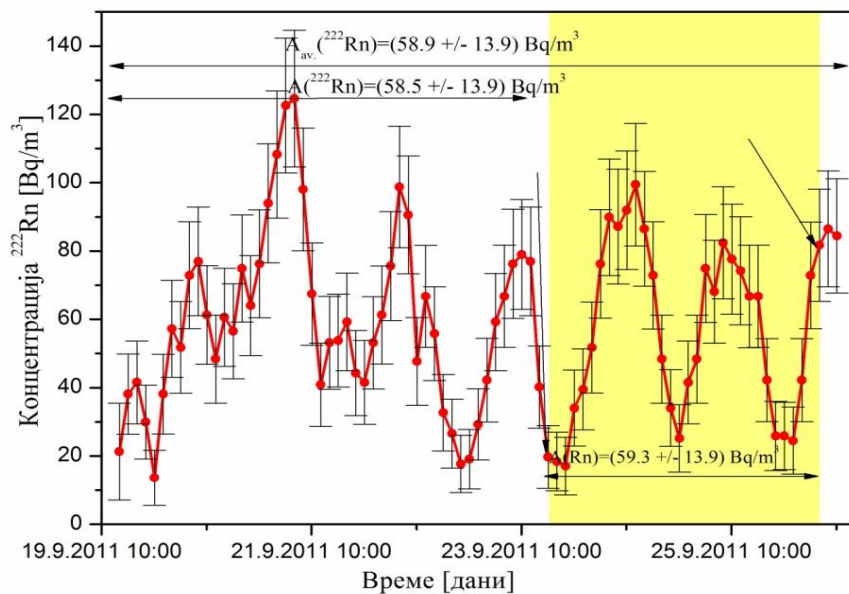
Слика 74. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Георгије С. Раковски Нова Варош)



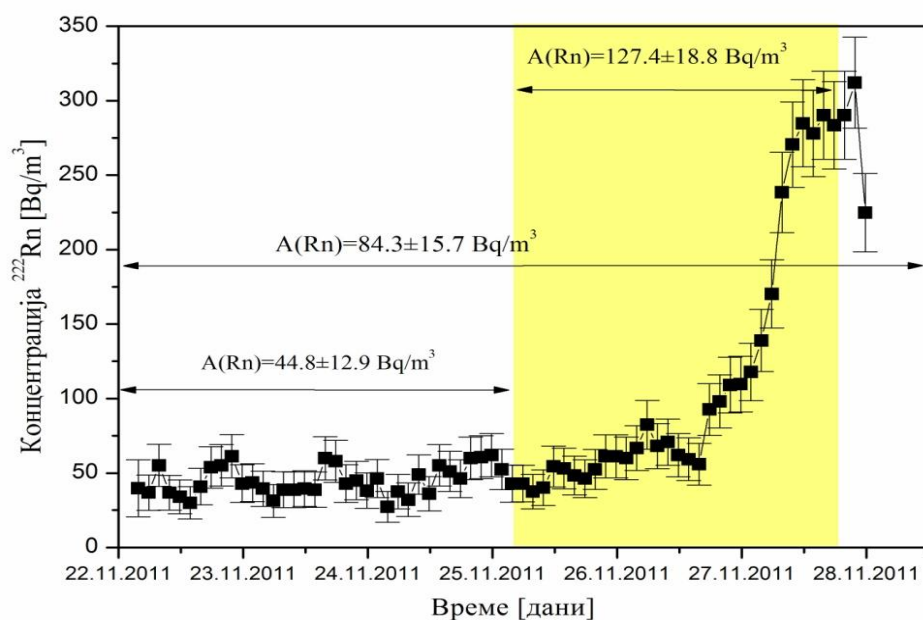
Слика 75. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Бранко Ћопић Борик)



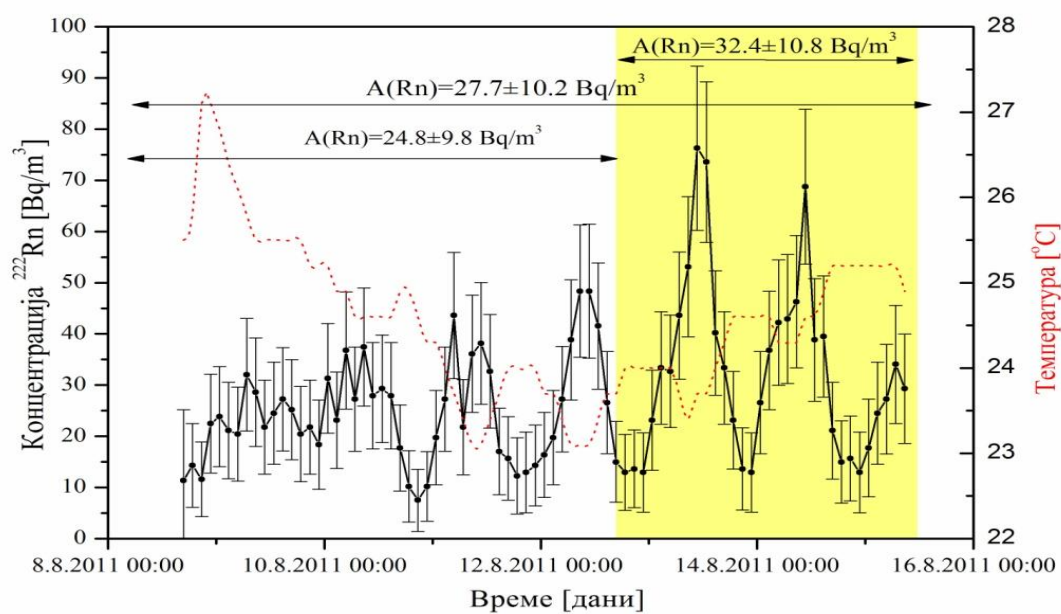
Слика 76. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Петар Кочић Хан Кола)



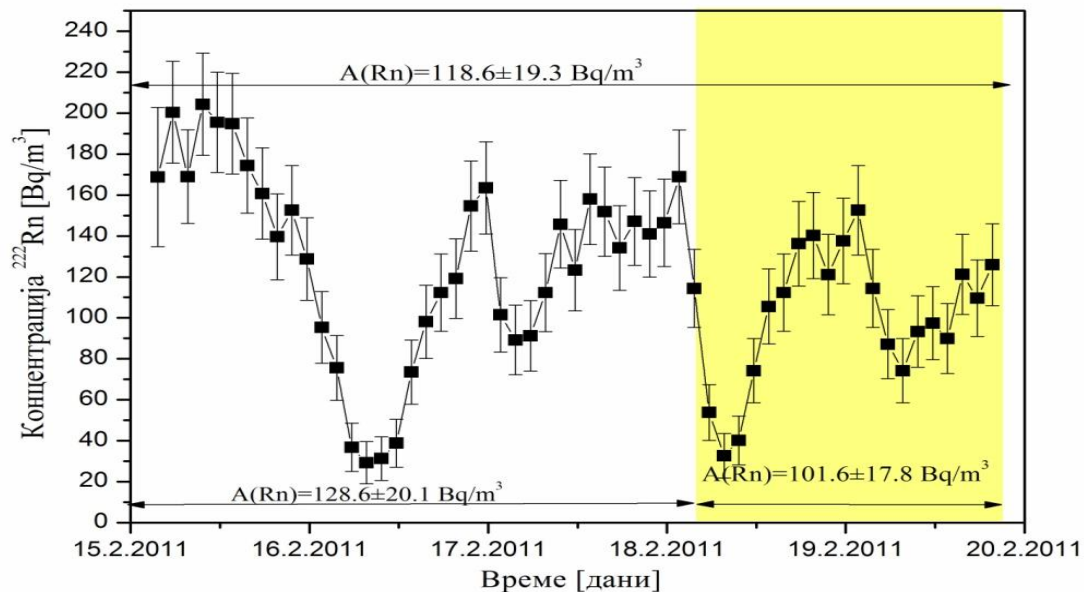
Слика 77. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Петар Петровић Његош Мејдан)



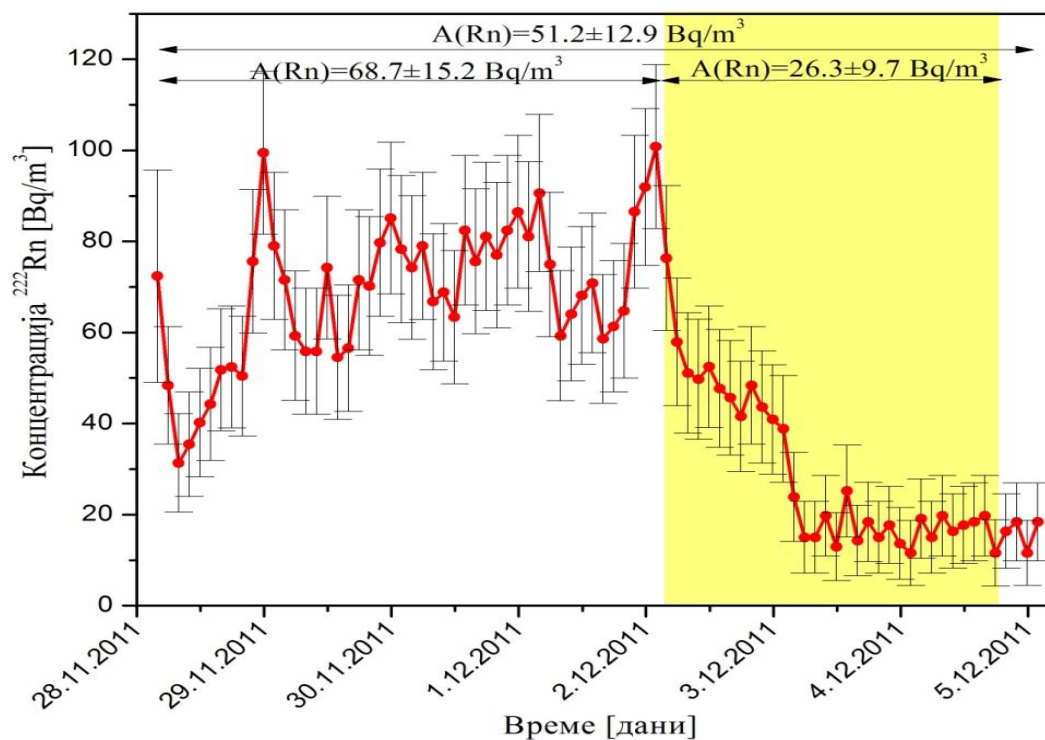
Слика 78. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Војислав Илић Крупа на Врбас)



Слика 79. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Змај Јова Јовановић Хисете)



Слика 80. Дијаграм концентрација радона (ОШ. Алекса Шантић Малта)



Слика 81. Дијаграм концентрација радона (ОШ.Милан Ракић Карановац)

## **Биографија - Зоран Ћургуз**

Рођен 20.05.1971. године у Санском Мосту.

1990. године завршио средњу Електротехничку школу у Санском Мосту.

1995. године завршио Педагошка академија, смер Математика-Физика, Бања Лука.

2000. године завршио Природно-математички факултет, смер Физика, Бања Лука.

2009. године магистрирао на Универзитету у Новом Саду на тему *„Мјерење јона у околини рендген апарата различитих типова и генерација“*

### **Радно искуство:**

21.03. 2001. Медицинска школа у Добоју.

01.10. 2004. Виша техничка школа у Добоју, стручни сарадник из предмета физика.

01.10. 2006. Саобраћајни факултету у Добоју, асистант на предмету физика.

10.12. 2009. Саобраћајни факултету у Добоју, виши асистент на предмету физика.

Ожењен, супруга Бранка и има две ћерке: Анђелу и Марију.